tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 39 - nr. 2 - 1974

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Electronika- en Radiogenootschap
Postbus 39, Leidschendam. Gironummer 94746 t.n.v.
Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

Het Genootschap stelt zich ten doel in Nederland en de Overzeese Rijksdelen de wetenschappelijke ontwikkeling en de toepassing van de elektronica en de radio in de ruimste zin te bevorderen.

Lidmaatschap

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat -behoudens ballotage- open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt f 40,--. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

DE EXAMENS

De examens door het Genootschap ingesteld en afgenomen zijn:
a. op lager technisch niveau:"Elektronica monteur NERG"
b. op middelbaar technisch niveau: Middelbaar Elektronica Technicus NERG"
c. voor het oude examen "Elektronica Technicus NERG" kan volgens de beeindigingsregeling nog slechts tot en met 1975 worden ingeschreven.

Brochures waarin de exameneisen en het examenreglement zijn opgenomen kunnen schriftelijk worden aangevraagd bij de Administratie van de Examencommissie.

Voor deelname en inlichtingen wende men zich tot de Administratie van de Examencommissie NERG, Genemuidenstraat 279, den Haag, gironummer 6322 te den Haag.

ANALOGE VERMENIGVULDIGERS IN OSCILLOGRAFEN

Ir. J.C. van Eijk, ontwikkeling oscillografie
Philips Test and Measuring Instruments.

Het toevoegen van een vermenigvuldig funktie aan een oscillograaf opent nieuwe meetmogelijkheden. Door de sterke verbetering de laatste jaren van vermenigvuldigschakelingen en door gebruikmaking van moderne technieken wordt het mogelijk vermenigvuldigers te maken die behalve nauwkeurig ook nog breedbandig en vooral betaalbaar zijn.

Deze inleiding behandelt het nut van het inbouwen van vermenigvuldigers, het werkgebied, het basisprincipe en de toegepaste technologie van de schakeling en tenslotte het belangrijkste, de nieuwe applicatiemogelijkheden.

In fig. 1 wordt 's werelds eerste universele hoogfrequent oscilloscoop met ingebouwde vermenigvuldiger getoond.



Fig. 1. 's-Werelds eerste universele oscilloscope met vermenigvuldiger.

WAAROM EEN INGEBOUWDE VERMENIGVULDIGER?

Het eerste wat men zich af kan vragen is of het wel echt nodig is om de vermenigvuldiger in te bouwen. In bouwblok-vorm zijn de laatste jaren verschillende typen te koop, en zij zouden in principe los gebruikt kunnen worden in combinatie met een geschikte oscilloscoop als afleesapparaat. Het antwoord wordt duidelijk als men het opstellingschema bekijkt.

In fig. 2.
Naast de losse vermenigvuldiger zijn nog diverse hulpschakelingen nodig. Ten eerste moet een geschikte, gestabiliseerde voeding beschikbaar zijn, zowel positief als negatief. Ten tweede moeten de te meten signalen aangepast worden aan de ingangsniveaus van de vermenigvuldiger. Dit betekent dat zowel verzwakkers als voorversterkers nodig zijn. Verder heeft de schakeling behoefte aan balansregelingen aan de ingangen en de uitgang. Zij zijn nodig om meetfouten te voorkomen die ontstaan als DC offsetspanningen aanwezig zijn. Samen met het feit dat nog steeds een oscilloscoop nodig is voor het bekijken van de uikomsten, leidt dit tot een betrekkelijk ingewikkelde meetopstelling, duur in componenten maar vooral ook duur vanwege de tijd nodig om alles werkend te krijgen.
Vrijwel alle eerder genoemde voorzieningen zijn normaal reeds aanwezig in een oscillograaf.

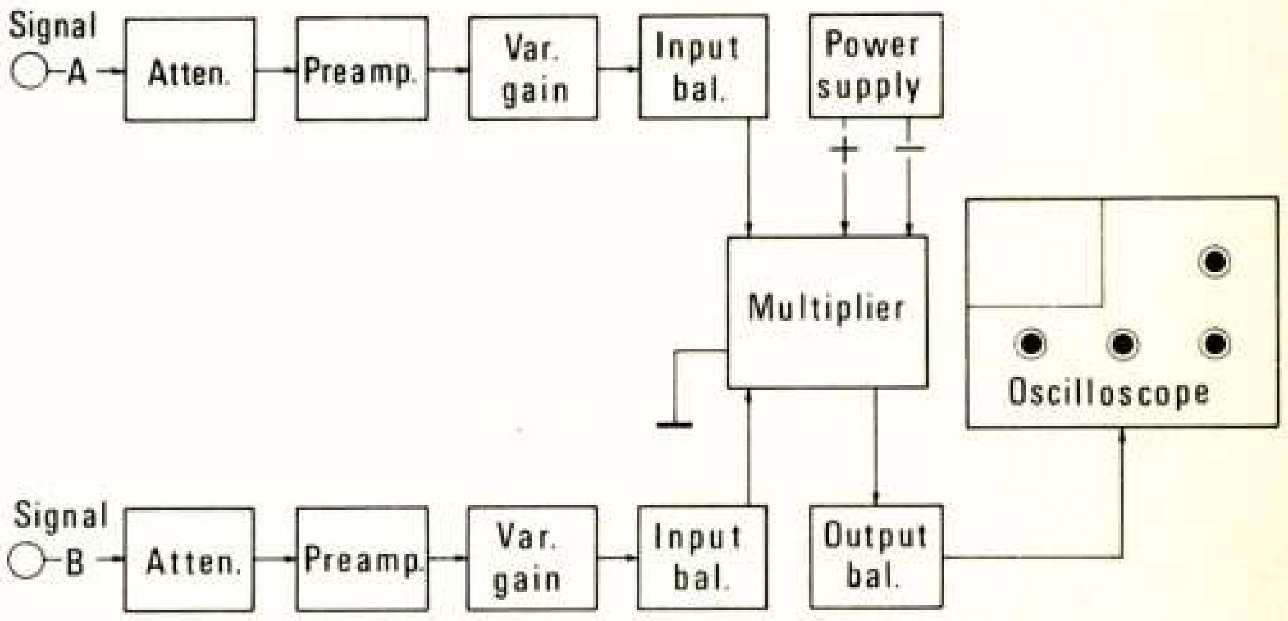


Fig. 2. Blokschema met niet ingebouwde vermenigvuldiger.

Een ingebouwde vermenigvuldiger levert de volgende figuur op (fig. 3) die qua eenvoud een schril kontrast vormt met fig. 2.

De schakeling is direkt gereed voor het meten van het produkt van twee signalen. Als voorbeeld wordt één kanaal hier gebruikt als spanningsingang en de andere als stroomingang.

Op het scherm kan dan direkt en gecalibreerd het elektrisch momenteel vermogen worden afgelezen.
Door toepassing van diverse transducers kunnen vele andere grootheden worden aangesloten en vermenigvuldigd.

B.v. Kracht x weg
Koppel x toerental

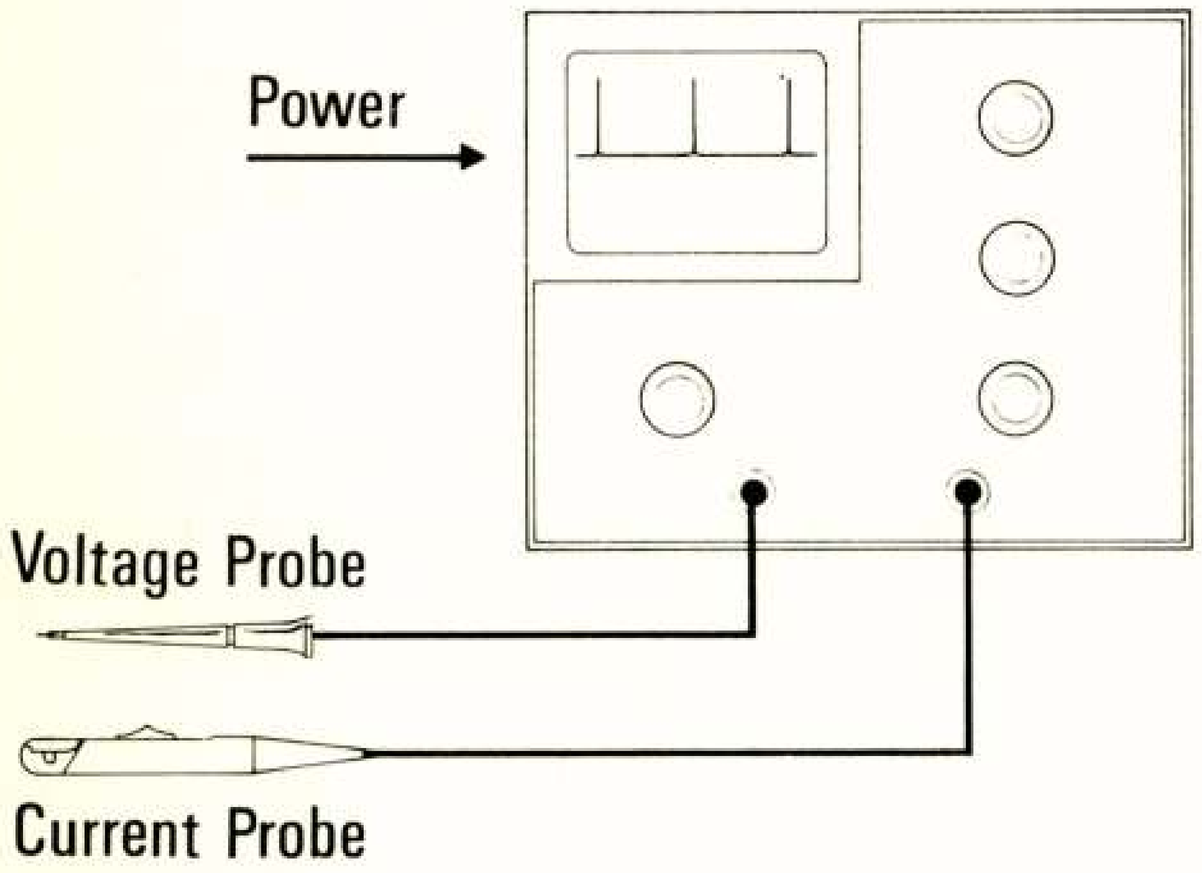


Fig. 3. Blokschema van een ingebouwde vermenigvuldiger.

DE VERMENIGVULDIGENDE OSCILLOSCOPE

Deze nieuwe kombinatie kan het best worden beschreven door het werkgebied, het principe de technologie en via een blokschema de samenhang met de oscilloscope te behandelen.

-Werkgebied. De bij Philips ontworpen vermenigvuldiger is van het "4 kwadranten" type. Hier wordt mee bedoeld dat de twee ingangen van de schakeling zowel positieve als negatieve ingangssignalen accepteert en dat het product aan de uitgang het juiste teken heeft. De term 4 kwadranten slaat op de 4 sectoren van een cartesiaans assenstelsel met de twee ingangssignalen langs de assen. Voor b.v. vermogen-studies opent dit de mogelijkheid om betrouwbaar onderscheid te maken tussen reeël (positief) en blind (negatief) vermogen.

-Principe van de schakeling. Fig. 4 toont het basisschema van de vermenigvuldiger. Dit bestaat uit twee stellen gepaarde transistoren TR_1TR_2 en TR_3TR_4 en twee gepaarde diodes D_1D_2. De twee ingangsspanningen V_x en V_y (niet getoond) zijn evenredig met de variabelen x en y die vermenigvuldigd moeten worden. Elke in-

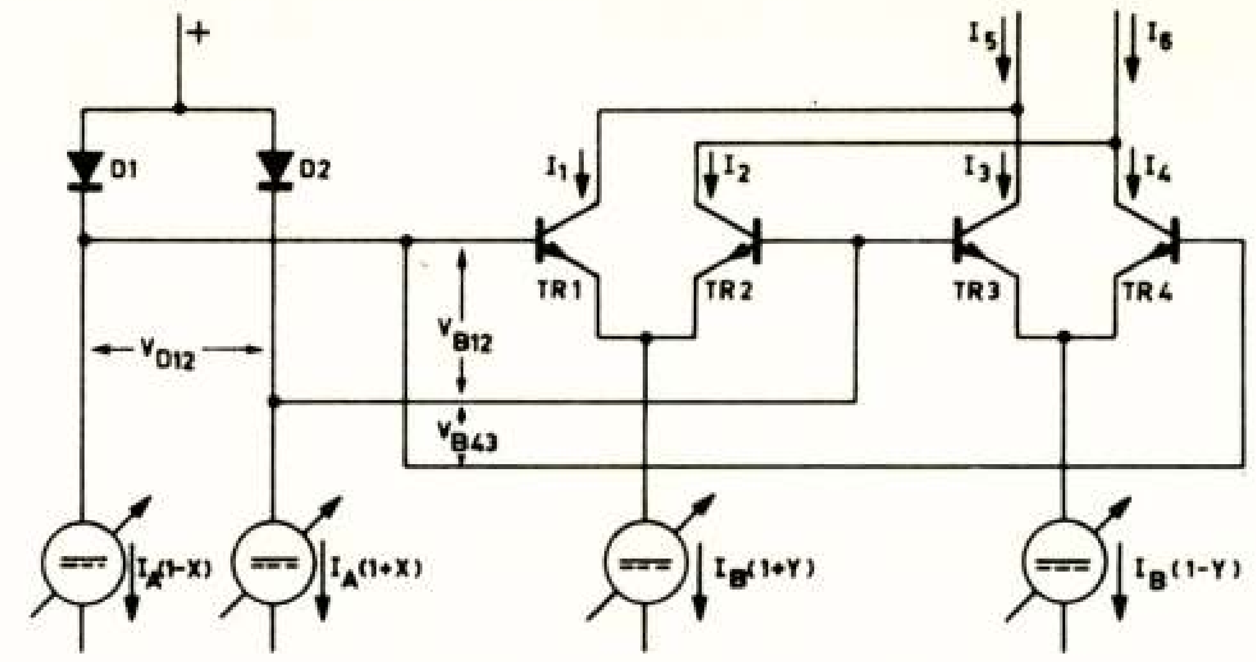


Fig. 4. Schema vermenigvuldigschakeling.

gangsspanning bestuurt een paar stroombronnen; de som van de stroombronnen die wordt gecontroleerd door V_x is $2I_A$, en de som van de stroombronnen bestuurd door V_y is $2I_B$.
Om de verklaring van de werking van de vermenigvuldiger te vereenvoudigen nemen we het volgende aan:

1. de junction temperatuur van de componenten is gelijk,
2. de relatie tussen spanning en stroom is exponentieel in al de junctions,
3. lekstromen zijn te verwaarlozen ten opzichte van de diode en collectorstromen,
4. de componenten zijn ideaal gepaard,
5. de basisstromen zijn nul.

In het schema is de spanning V_{D12} tussen de kathodes van de diodes D_1 en D_2 als de modulus van $|x| < 1$,

$$V_{D12} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{1 + x}{1 - x}\right) \qquad (1)$$

Waarin: k = Boltzmann's constante = $1,375 \times 10^{-23}$ J/°K
T = Kamertemperatuur in °K
q = de lading van een electron = $1,602 \times 10^{-19}$ C.

De spanning V_{D12} is gelijk aan V_{B12} (de spanning tussen de basis van TR_1 en TR_2) en ook gelijk aan V_{B43} (de spanning tussen de basis van TR_4 en TR_3)

$$V_{D12} = V_{B12} = V_{B43} \qquad (2)$$

waarin

$$V_{B12} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_1}{I_2} \qquad (3)$$

$$V_{B43} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_4}{I_3} \qquad (4)$$

Waarin I_n (waarin n kan variëren van 1t/m 4) de collectorstroom is van TR_n. Combinatie

van de vergelijkingen 1 t/m 4 geeft:

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_4}{I_3} = \frac{1 + x}{1 - x} \qquad (5)$$

Vergelijking (5) illustreert de principiële werking van de vermenigvuldiger; de verhouding van collectorstromen in elk van de transistor paren is gelijk aan de verhouding van de stromen door D_1 en D_2.
De andere stroom relaties in de vermeningvuldiger worden gegeven door de vergelijkingen 6 t/m 11:

$$I_1 + I_2 = I_B\ (1 + y) \qquad (6)$$
$$I_3 + I_4 = I_B\ (1 - y) \qquad (7)$$
$$I_1 + I_3 = I_5 \qquad (8)$$
$$I_2 + I_4 = I_6 \qquad (9)$$
$$I_5 - I_6 = I_1 - I_2 + I_3 - I_4 \qquad (10)$$
$$I_5 + I_6 = 2I_B \qquad (11)$$

Met de subtitutie voor het uitgangssignaal $I_5 - I_6$:

$$(I_5 - I_6)\ /\ 2I_B = z \qquad (12)$$

kan met de vergelijkingen 5 t/m 11 worden geschreven.

$$z = xy \qquad (13)$$

Het uitgangssignaal $I_5 - I_6$ of z is een maat voor het produkt van x en y, die op hun beurt evenredig zijn met de ingangsspanningen van de vermenigvuldiger. In de praktijk wordt dit signaal nog versterkt om bij gegeven eenheden voor de ingangssignalen een schaalfaktor één te bereiken in het uitgangssignaal. Bij verschillende op de markt verkrijgbare vermenigvuldigers is dit niet het geval en dan moet er nog een korrektiefaktor worden toegepast om de uitkomst te kunnen bepalen.

-Technologie en specifikatie. Nauwkeurig vermenigvuldigen vereist perfekte gelijkloop van transistoren, waardoor monolitische technieken noodzakelijk zijn. Het toepassen van een geavanceerd IC proces (fT ongeveer 2 GHz), het juist dimensioneren van de transistoren en diodes, de keuze van deze volledig gebalanceerde schakeling en de met de hoge fT samenhangende zeer kapaciteitsarme technologie heeft een circuit opgeleverd met de volgende, zeer aantrekkelijke kombinatie van eigenschappen.

- -Goede lineariteit
- -Hoge bandbreedte (40 MHz, inclusief oscilloscope)
- -Temperatuur stabiel (1,5 mV/°C op een uitgangssignaal van 100 mV/ schermdivisie)
- -Lage overspraak (-32 dB bij 40 MHz)
- -Nauwkeurig (inklusief komplete oscillograaf 2%)

-Blokschema. In fig. 5 is aangegeven hoe de vermenigvuldiger is opgenomen in het blokschema van een tweekanaals oscilloscoop. De funktie wordt ingeschakeld door een meerpolige schakelaar. Wanneer op vermenigvuldigen wordt overgeschakeld verbindt deze schakelaar het Y_A kanaal met de vermenigvuldiger. Het Y_B kanaal is permanent aangesloten op de B-ingang van de vermenigvuldiger en op de elektronische keuze-schakelaar van de vertikale afbuiging.
De uitgang is eveneens verbonden met het vertikale afbuigsysteem via de elektronische schakelaar door de uitgang terug te voeren in de normale A versterker, zodat als beide kanalen ingeschakeld zijn, de elektronische schakelaar twee signalen ontvangt Y_B en het produkt van Y_A en Y_B. De oscilloscoop kan dus op het scherm het produkt vertonen samen met een van de ingansfaktoren. ("chopped" of "alternate")

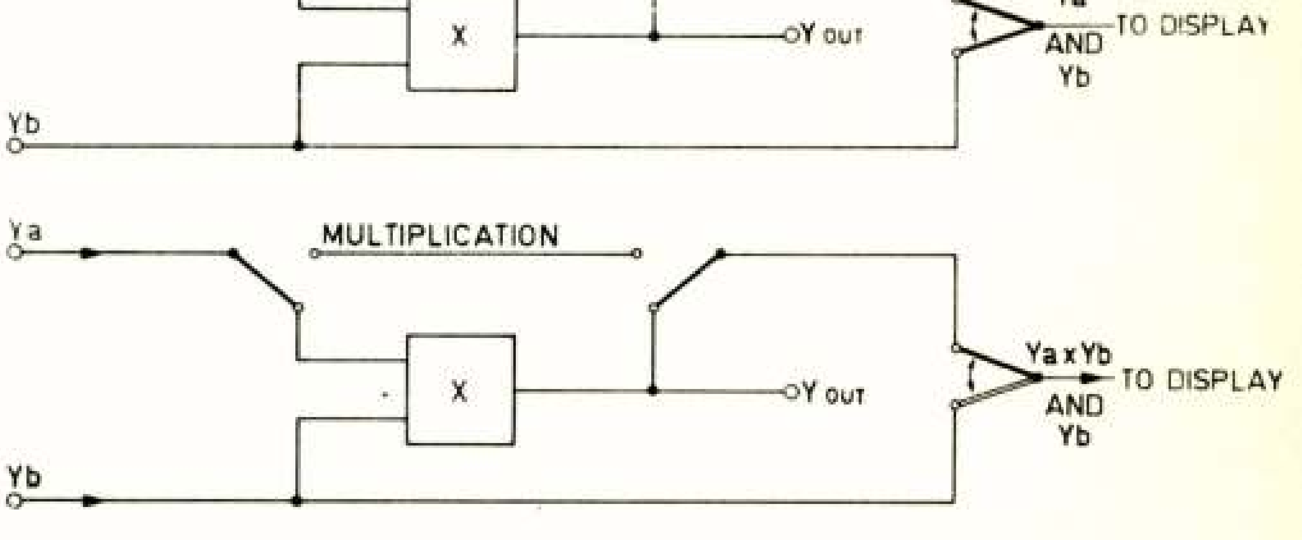


Fig. 5. Blokschema oscilloscope-vermenigvuldiger.

Naast de produktuitgang die naar het scherm wordt gevoerd, is er een tweede uitgang die rechtstreeks of via een integrator schakeling op een BNC uitgangskonnektor beschikbaar is op de achterzijde van het apparaat. Deze aansluiting heeft vele gebruiksmogelijkheden:

hij kan rechtstreeks worden gebruikt in een 50 Ohm systeem met de volle 40 MHz bandbreedte om de momentele waarde van het produkt op andere wijze te bestuderen of te bewerken; er kan ook een ingebouwde integratorschakeling worden ingeschakeld die het mogelijk maakt om gemiddelde waarden van periodieke signalen kwantitatief af te lezen met behulp van een eenvoudige gelijkspanningsmeter in kombinatie met bijv. momentele dus ook piekwaardeaflezing op het scherm. Eveneens kan de effektieve (rms) waarde worden bepaald van een signaal met volledige willekeurige golfvorm, door dat signaal op beide ingangen aan te sluiten en de schakeling te laten kwadrateren. Wanneer men nu de wortel trekt uit de voltmeteraflezing is letterlijk voldaan aan de uitdrukking "root mean square" en is de effektieve waarde bepaald.

VERMENIGVULDIGEN VAN SPANNINGEN EN/OF STROMEN

Voor een beter begrip van de vermenigvuldig operatie en de resultaten die mogen worden verwacht op het scherm en de uitgangskonnektor is het interessant de ingangssignalen als volgt te schrijven:

signaal $Y_A = A \cos \omega t$

$Y_B = B \cos (\omega t + \varphi)$

Door gebruikmaking van de formules

$$\cos \alpha \cos \beta = 1/2 \quad \cos(\alpha+\beta)+\cos(\alpha-\beta)$$

en aannemend dat

$$\omega t + \varphi = \alpha \text{ en } \omega t = \beta$$

vinden wij dat het produkt

$$Y_A \times Y_B = 1/2AB \left\{ \cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi) \right\}$$

Dit produkt kan worden gesplitst in een gelijkspanningskomponent $1/2AB\cos \varphi$ en een wisselspanningskomponent $1/2AB\cos(2\omega t + \varphi)$. De gelijkspanningskomponent kan op het scherm worden waargenomen als een vertikale beweging van de wisselspanningsinformatie en eventueel nauwkeuriger worden afgelezen op de uitgang met een digitale voltmeter.

De gelijkspanningskomponent geeft de gemiddelde waarde aan van het produkt. Indien het faseverschil tussen de beide ingangssignalen 0 is, is cos 0 = 1 en heeft de gelijkspanningskomponent zijn maximale waarde. In termen van elektrisch vermogen: het gedissipeerde vermogen is maximaal wanneer stroom en spanning in fase zijn (ohmse belasting).

Als het faseverschil 90° bedraagt, is $\cos \varphi = 0$ en de gelijkspanningscomponent is 0. In termen van elektrisch vermogen: er wordt geen vermogen gedissipeerd wanneer stroom en spanning een faseverschil van 90° hebben (ideale spoel of kapaciteit).

De wisselspanningskomponent $1/2AB\cos(2\omega t + \varphi)$ heeft op het scherm altijd dezelfde vorm, ongeacht het faseverschil. Deze informatie vertoont een vertikale verschuiving afhankelijk van het oorspronkelijke faseverschil. Horizontaal verschuift alleen het startpunt met φ.

VOORBEELD VAN EEN ELEKTRISCHE VERMOGENSMETING OP HET SCHERM.

De fig. 6 t/m 8 laten zien hoe de oscilloscope een volledig gekalibreerde methode biedt voor het bestuderen van vermogenspieken in snelschakelende circuits. Ing fig. 6 wordt de kollektorspanning van een vermogenstransistor afgebeeld van een 320-24 V DC-DC converter.

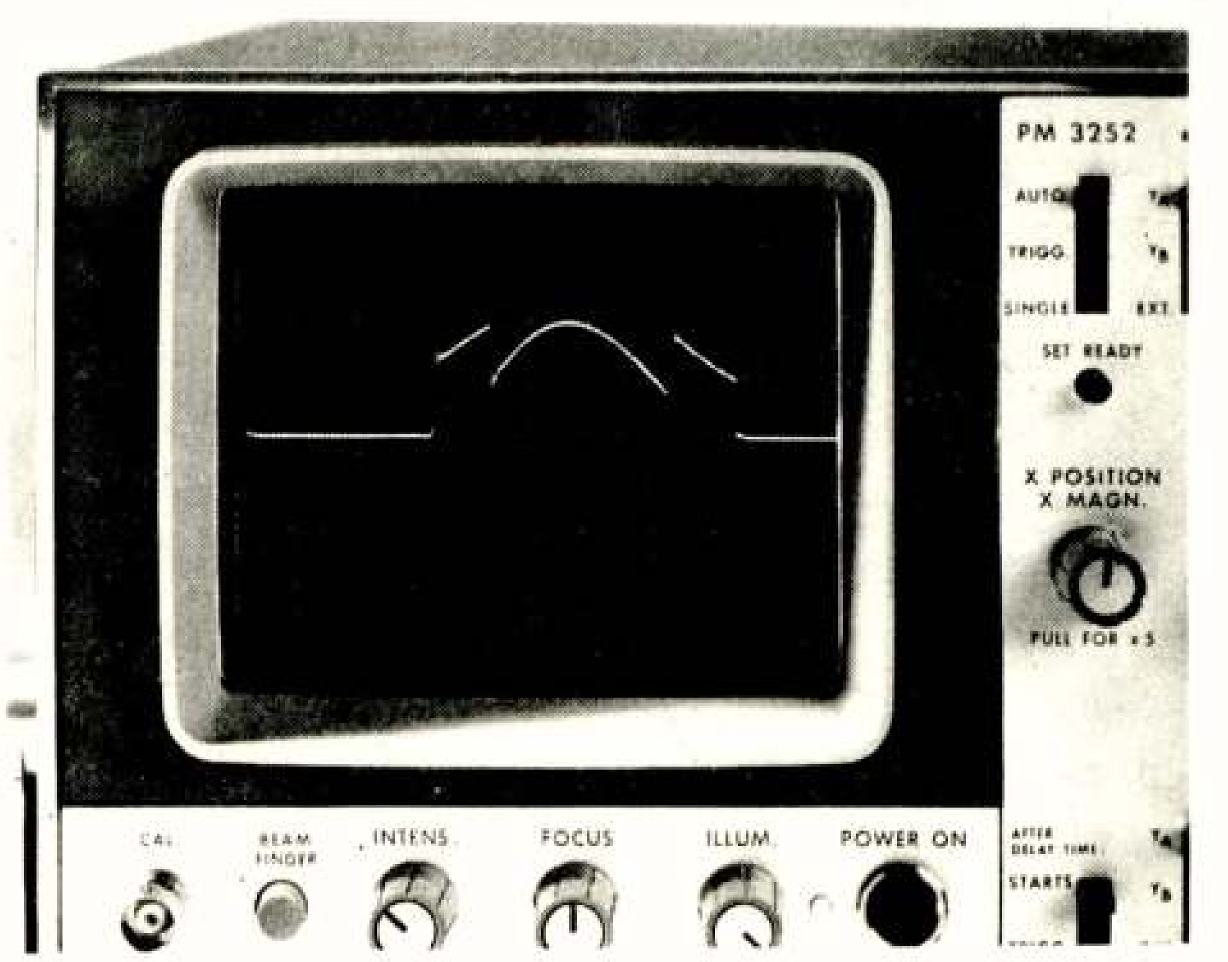


Fig. 6. Kollektorspanning (200V/DIV) van een vermogenstransistor uit een 320-24V DC-DC convertor.

Bij een gevoeligheid van 200 V/div. met een tijdbasis van 1/2 µsec/div. Op het tweede vertikale kanaal is de stroom aangesloten. Calibratie 1/10A/div. (fig. 7). Na overschakelen op de produktfunktie kan de kollektorvermogen

direkt worden afgelezen. De vertikale gevoeligheid is nu 200 V x 1/10 A = 20 W/div. De vermogensnaald blijkt een piekwaarde van 70 W te hebben.

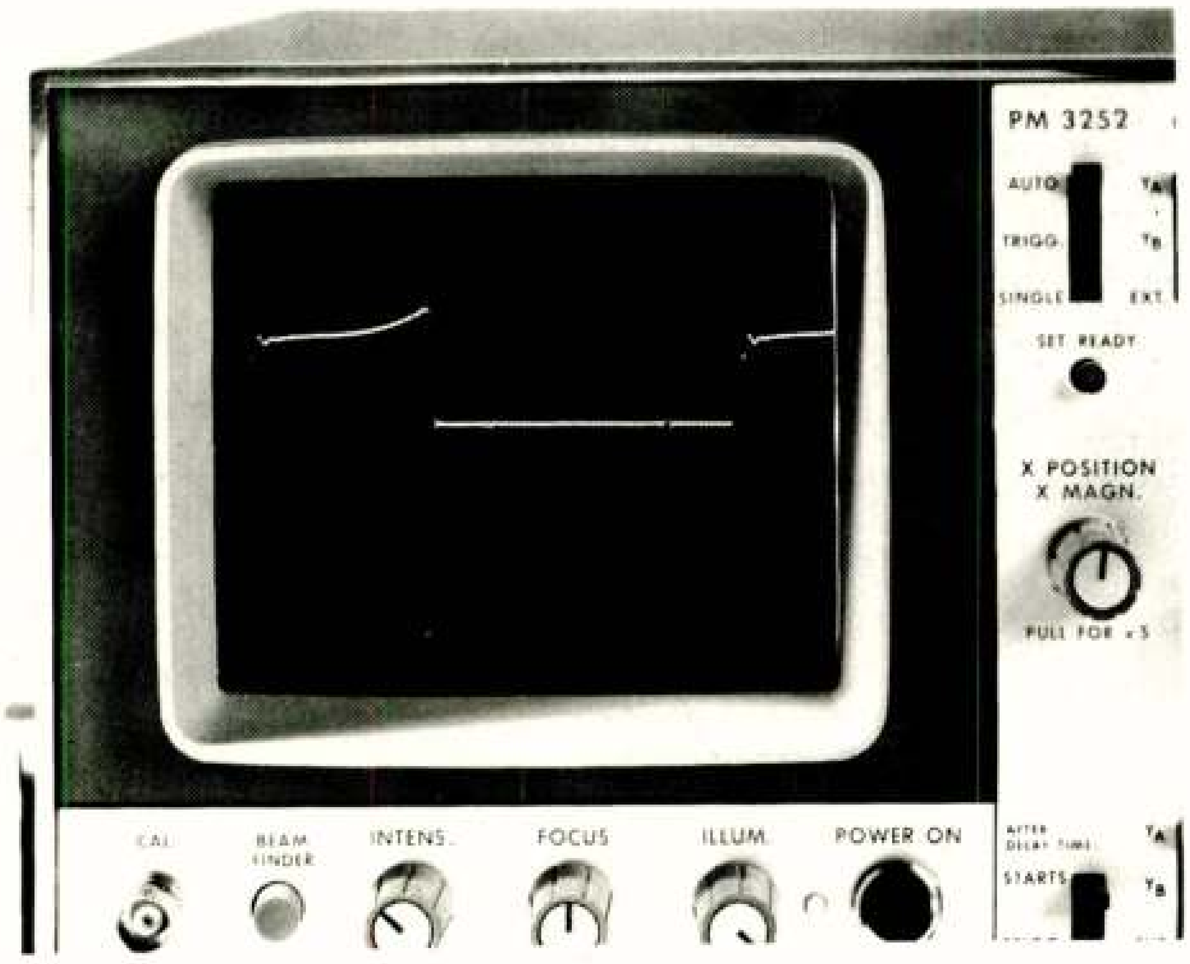


Fig. 7. Kollektorstroom.

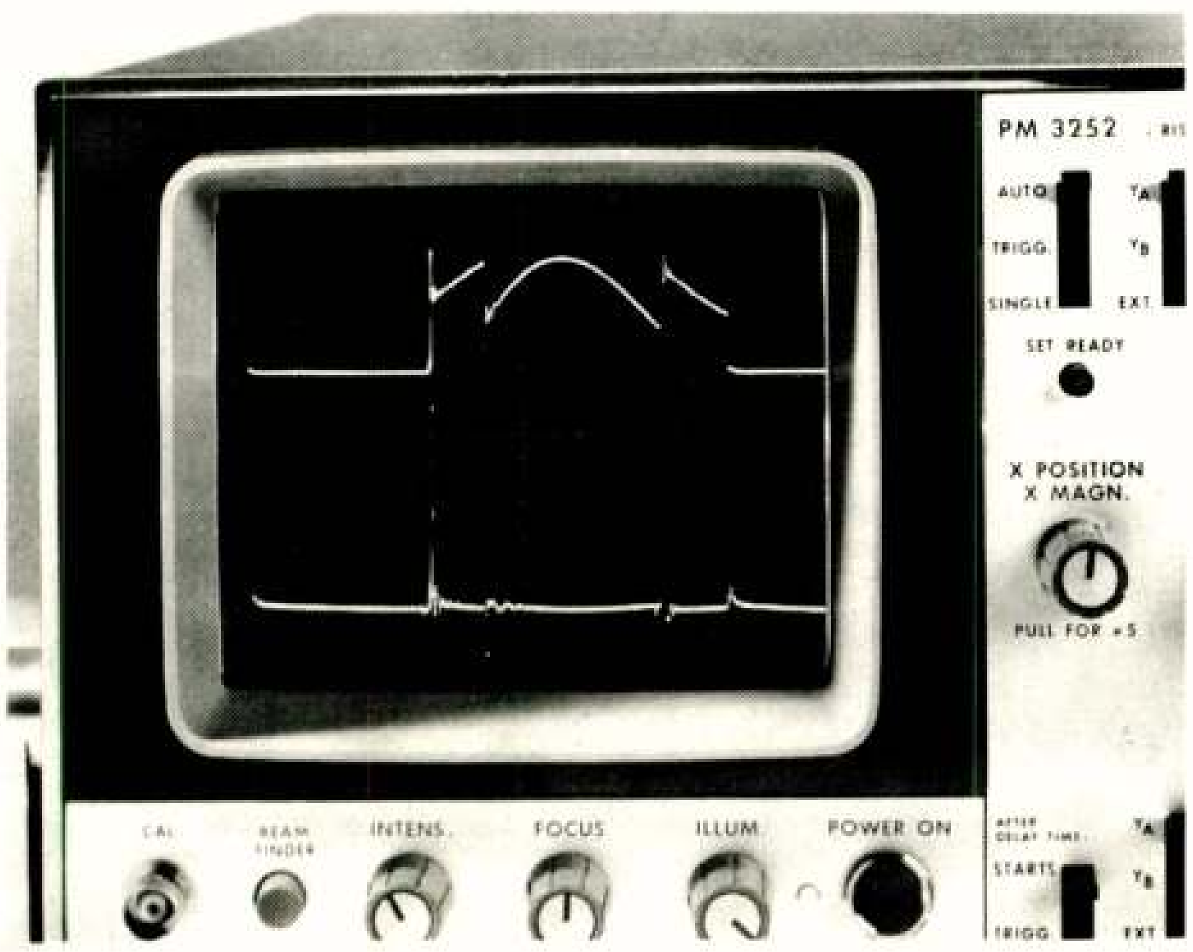


Fig. 8. Momenteel vermogen (produkt) rechtstreeks afleesbaar (20W/DIV) samen met één der faktoren.

Door het produkt en één van de faktoren samen op het scherm te brengen (zie fig. 8) kan worden vastgesteld dat de vermogenstransient optreedt gedurende de zeer korte tijd dat de transistor omschakelt van de stroom naar de spanningstoestand. Het momentele kollektorvermogen en dus ook de diverse piekwaarden zijn rechtstreeks af te lezen op het scherm. De gemiddelde waarde, de kollektordissipatie is in principe te bepalen door de oppervlakte onder de produktlijn uit te rekenen (blokjes tellen) en de gedeeltes boven en onder de nullijn van elkaar af te trekken. Bij periodieke signalen is dit gemiddelde sneller bepaald door een eenvoudige voltmeter aan te sluiten op de externe uitgang (eventueel met inschakeling van de ingebouwde integrator). Er doen zich echter een aantal gevallen voor, waaronder het net gegeven voorbeeld, waarin het gewenst is om de gemiddelde waarde te bepalen oven een ander tijdsinterval dan dat van de komplete periode b.v. het produkt heeft relatief korte hoge waarde t.o.v. de periodetijd, de middeling wordt dan onnauwkeurig. Een ander voorbeeld is het bepalen van de gemiddelde waarde van een beperkt gedeelte van een produkt golfvorm om onderscheid te kunnen maken tussen het reëele en het blinde vermogen, of om verliezen te analyseren. In deze gevallen kan een goed resultaat worden bereikt door gebruik te maken van een integrerend sample en hold circuit in kombinatie met de reeds in de scope aanwezige funkties als tweede tijdbasis en delayed gate impuls.

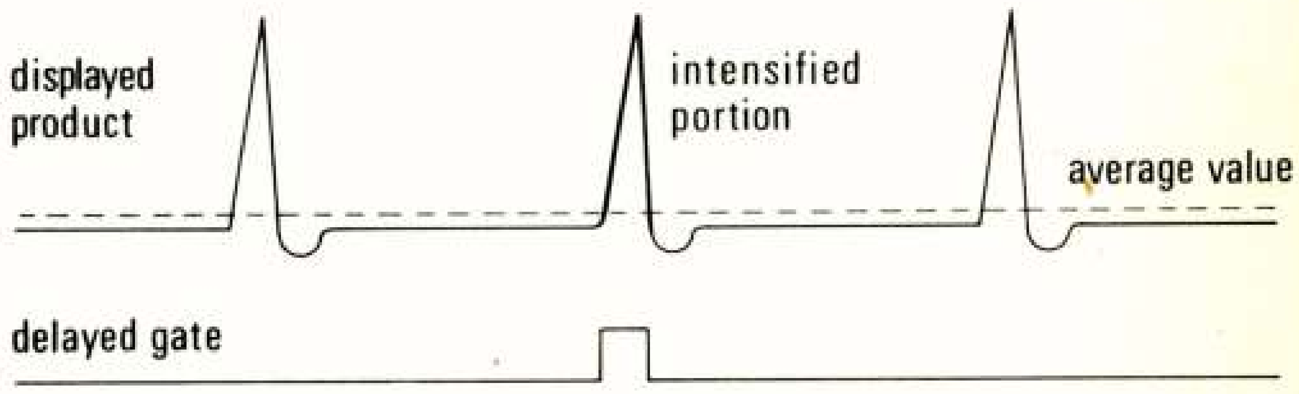


Fig. 9. Produkt-signaal met lage gemiddelde waarde.

Figuur 9 laat een produktsignaal zien met een relatief lage gemiddelde waarde. Indien men nu de gemiddelde waarde van het positieve deel van de signaalvorm wil bepalen wordt de vertraagde tijdbasis ingeschakeld in de "Intensified" mode en de lengte en plaats van het tijdbasisgedeelte met hogere helderheid dusdanig gekozen dat het geselecteerde gedeelte van de golfvorm precies bedekt is. Gedurende het tijdsinterval dat overeenkomt met het oplichtende stuk van de tijdbasis wordt door de vertraagde tijdbasis een positief gaande zogenaamde delayed-gate uitgangsimpulse afgegeven via een bus op de achterzijde van het apparaat. Het blokschema van een integrerend sample en hold circuit in deze toepassing is weergegeven in de volgende figuur.

Integrating Sample & Hold Circuit

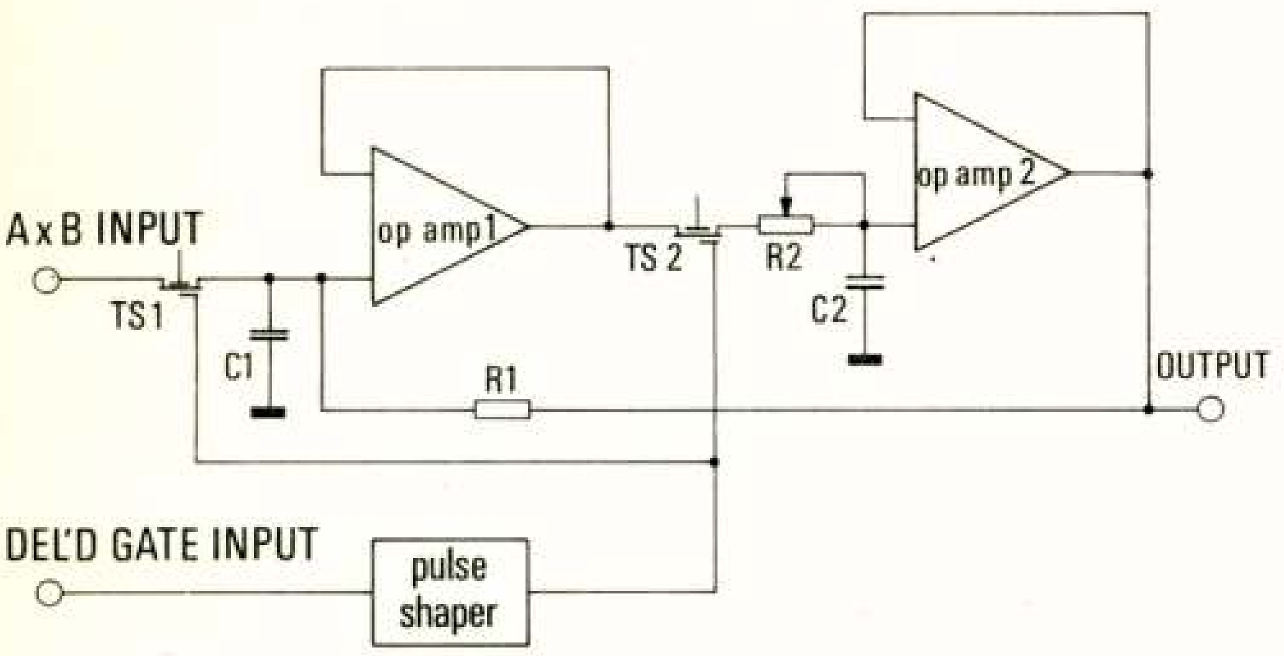


Fig.10. Blokschema integrerend "sample" en "hold" circuit.

De ingangen van het circuit worden verbonden met de overeenkomstige uitgangsklemmen van de oscilloscoop, te weten: de produkt uitgang en de delayed-gate. Het circuit zal nu een signaal afgeven ter grootte van de gemiddelde waarde van het geselecteerde signaalgedeelte.

APPLIKATIES

Volgens onze huidige inzichten onderscheiden zich momenteel vier hoofdapplikatiegebieden.

1. Allerlei vormen van het meten van dynamisch elektrische vermogens.
2. Dynamisch fase meten, fasevariaties meten, nauwkeurig fase instellen.
3. Metingen met behulp van transducers aan mechanische grootheden.
4. Educatie.

Onderverdeeld in deze vier kategoriën volgen nu enkele applikatievoorbeelden.

Kategorie 1 - elektrisch vermogen.

1. In het algemeen alle gevallen waarbij het gedissipeerde vermogen kritisch is voor komponenten of omgeving en waarbij sprake is van een komplexe belasting d.w.z. dat stroom en spanning een faseverschil hebben.
2. Voedingen, schakelende voedingen.
3. T.V. ontwikkeling en applikatie, diverse videouitgangstrappen.
4. Halfgeleide applikatie laboratoria
5. Thyristor sturingen.
6. Audio en Hi-Fi.
7. Ontstekingen in auto's, flitslampen, aansteker s.
8. Komponentenstudies.
9. Nondestructief testen van komponenten.

Kategorie 2 - fase meten.

1. Fase afregelingen bij hoogfrekwent signalen tot op 1 graad nauwkeurig.
2. Fase metingen van signalen met vervorming, (veelal geeft dit problemen bij fase meetbruggen).
3. Dynamisch meten van fase variaties in b.v. rekorders, wow en flutter.
4. Nauwkeurig vergelijken van twee frekwenties door de fasehoek te registreren m.b.v. de uitgang.

Kategorie 3 - mechanische metingen

1. Mechanisch vermogen van motoren door koppel- en toerental op te nemen en te vermenigvuldigen.
2. Vermogen bij verplaatsingen, b.v. kracht maal weg bij zuigers.

Kategorie 4 - educatie

1. Kwadrateren van rechte lijn naar parabool.
2. Kwadrateren van sinus cosinus funkties.
3. Onderzoek van cosinus faktoren.
4. Verhoudingen van reëel tot blind vermogen.
5. Modulatie.



Fig.11. PM 3253. Storage oscilloscope met vermenigvuldiger.

Tot slot kan worden gesteld dat bij veel van deze applikaties het niet alleen gaat om periodieke maar ook om eenmalige of zeer weinig repeterende signalen. In figuur 11 is een storage versie van de vermenigvuldigende oscilloscoop te zien met variable persistentie die het mogelijk maakt ook deze signalen te bestuderen. Een duidelijk voorbeeld is, los van de specifieke applikatie, het bestuderen van inschakelverschijnselen.

Voordracht gehouden op 2 - 10 - 1973 tijdens "Het Instrument" in de RAI in Amsterdam, werkvergadering no. 233

ELECTRONISCHE HULPMIDDELEN VOOR HET NACHTKIJKEN

Dr. P. Schagen

Mullard Research Laboratories Redhill Surrey England

Electronic aids to night vision

The performance of an image detector is limited at the lowest light levels by the statistical fluctuations in the numbers of photons detected, and can be described with the aid of acuity curves, relating the minimum size of just detectable object details to their brightness, as a function of the contrast.

It is shown how electronic instruments can, under these conditions, improve on the performance of the unaided eye by capturing a larger fraction of the available photons, and using these more efficiently. The important parameters of image intensifiers of this kind are discussed, while the problems of the alternative approach to night vision, employing thermal image conversion, is also briefly mentioned.

Inleiding

Ik neem aan dat niet velen van U in 1928 oud genoeg waren om de wetenschappelijke literatuur te lezen. Als dit echter wèl het geval was, zult U zich misschien herinneren een verhaal te hebben gelezen in de allereerste jaargang van een tijdschrift genaamd "Television", dat de voorganger was van wat is nu "The Journal of the Royal T.V. Society".

Dit artikel, getiteld "The Triumph of the Noctovisor", beschrijft hoe een massale opstand van de ontembare bergbewoners langs de N.W. grens van India in de kiem werd gesmoord. Dit was te danken aan het feit dat op het kritieke ogenblik een vertegenwoordiger van een Engelse firma, waarvan ik de naam maar niet zal noemen, op het strijdtoneel verscheen met het prototype van een geluidloos machinegeweer, voorzien van een revolutionair vizier, de "noctovisor". Dit vizier kon worden gebruikt zonder de noodzaak voor zoeklichten, en was gesynchroniseerd met een nauwe bundel infrarood licht (misschien een Neodymium laser?). Het gebruik, tijdens de donkere nacht, van dit spookachtige wapen veroorzaakte paniek onder de aanvallers en de opstand zakte volledig in elkaar.

De onthulling van het verhaal is gegeven in de laatste paragraaf met de verklaring dat zelfs voordat de vertegenwoordiger naar Engeland terugkeerde, hij een telegram ontving van zijn hoofdkantoor om hem te laten weten dat de firma een order had ontvangen van het Ministerie van Defensie voor 1000 van de nieuwe apparaten. Voor diegenen onder ons die van tijd tot tijd met regeringsinstanties hebben te maken, verwijdert deze paragraaf de laatste twijfel dat het verhaal berust op "science fiction".

Het is nu meer dan 45 jaar geleden, sinds dit artikel verscheen, en "noctovisors" van verschillende aard zijn gerealizeerd in de praktijk. In deze voordracht hoop ik U aan te tonen hoe zulke electronische middelen kunnen worden toegepast om een verbetering te verkrijgen in de visuele waarneming bij nacht, vergeleken met het ongewapende oog.

De Gevoeligheidsbegrenzing van een Beeldvormend Apparaat

Een optisch beeld kan in het algemeen worden gedefinieerd als een 2-dimensionale beschrijving van voorwerpen en hun omgeving, met electromagnetische straling als de variabele. Deze straling kan worden gereflecteerd door de objecten, die in dat geval moeten worden belicht door een aparte stralingsbron, of kan worden uitgestraald door het object zelf, als dit lichtgevend is.

In beide gevallen komt het beeld tot stand door het gebruik van een beeldvormend apparaat, waarvan het waarnemingsvermogen kan worden aangeduid met behulp van krommen die het verband aangeven tussen de kleinste afmetingen van een object detail dat not juist kan worden waargenomen, en de helderheid, voor verschillende waarden van het contrast tussen dat detail en de omgeving.

Het waarnemingsvermogen van een ideale beeldapparatuur is uiteindelijk slechts beperkt door de statistische fluctuaties in de aantallen photonen die het ontvangt, veroorzaakt door de willekeurige aard van het emissie proces.

Het probleem van het waarnemen van kleine details bij lage helderheden komt zodoende neer op het in staat zijn een onderscheid te maken tussen het verschil in de aantallen photonen ontvangen van een objectdetail en van het aangrenzende element (het „signaal") aan de ene kant, en de statistische fluctuaties in deze aantallen (de „ruis") aan de andere kant. Als de signaal-ruis verhouding te klein wordt, is het apparaat niet langer in staat het objectdetail waar te nemen.

Deze photonen-ruisbegrenzing kan worden uitgedrukt in een algemene formule (Schagen, 1971), welke in iets

gewijzigde vorm voor het eerst was geformuleerd door de Vries (1943) en Rose (1942):

$$(1)\quad L_m \alpha^2 = \frac{\text{konstante} \times (S/N)^2_{min}}{D^2 \tau \theta P C^2}$$

waarin

L_m = gemiddelde helderheid van objectdetail en aangrenzend element,

α = de hoek onder welke het apparaat het objectdetail ziet,

$(S/N)_{min}$ = de minimum signaal-ruis verhouding die nodig is om het detail nog juist waar te kunnen nemen (dit hangt af van het detailtype, en varieert van ongeveer 1 voor een een „zebra"-patroon tot bijv. 1,9 voor Landolt C's),

D = diameter van het objectief,

τ = integratie-tijd van het instrument,

θ = quantum-efficientie,

P = aantal photonen per seconde, overeenkomend met 1 lumen (afhankelijk van de betreffende straling),

C = optisch contrast tussen het object detail en aangrenzende element $\left(C = \frac{L_h - L_\ell}{L_h + L_\ell}\right)$.

In het algemeen kan de photonen-ruisgrens niet bereikt worden voor zeer kleine object details, tengevolge van de beperking in de optische eigenschappen van de apparatuur. Deze kunnen worden beschreven met behulp van de modulatie-overdrachtsfunctie (m.o.f.). Het instrument wordt hiervoor gericht op „zebra"-patronen van zwarte en witte banden met een sinusvormige intensiteitsverdeling. De m.o.f. beschrijft dan de modulatiediepte in het uitgangsbeeld als functie van de lijnfrequentie voor maximaal contrast in het patroon (C = 1).

Het effect op het beeld van een slechtere m.o.f. is een ogenschijnlijke verkleining van het contrast (C), die gewoonlijk in betekenis toeneemt naarmate het objectdetail kleiner wordt (kleinere α).

De invloed hiervan op de „acuity"-kromme is dat de photonen-ruisbegrendsde werking, die nauw kan worden benaderd voor de grotere details, niet langer van toepassing is voor de kleinere waarden van α. Een schematische kromme voor zo een instrument is weergegeven in figuur 1.

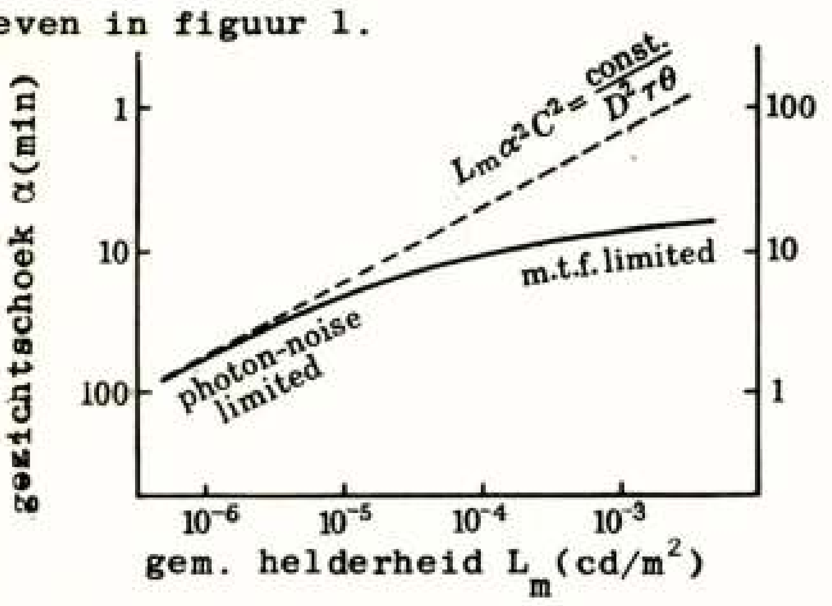


Fig. 1. Typisch waarnemingsvermogen van een beelddetector

Het Oog

Uitvoerige metingen van het waarnemingsvermogen van het ongewapende oog zijn o.a. uitgevoerd door Blackwell (1946) en Pirenne (1957) en hun medewerkers. Deze leidden tot de conclusie dat in daglicht het oog begrensd is door de modulatie-overdracht, maar in het donker door de photonenruis. In de praktijk probeert het oog bij nacht het waarnemingsvermogen te verhogen door meer photonen te vangen (pupilvergroting-grotere D), en deze nuttiger te besteden (adaptatie van kegeltjes tot staafjes-zien met een integratie over grotere elementaire gebiedjes van het netvlies) en te integeren over langere tijd (grotere τ).

Voor het donker-geadapteerde oog kan zodoende een waarde voor $L_m\alpha^2$ worden bereikt van bijna 0,02 (voor L_m in cd/m^2 en α in boogminuten). Dit betekent dat bij een integratietijd van 0,02 sec. de quantum efficientie ongeveer 1% is.

Zuiver optische apparaten (nachtkijker of telescoop) kunnen een verbetering geven met behulp van een grotere doorsnede van het objectief D. Het gevolg is dat meer photonen worden opgevangen, maar deze worden dan uitgespreid over een groter oppervlak op het netvlies. De waarnemingskrommen verschuiven zodoende naar kleinere waarden van α met de vergrotingsfactor van het instrument, hoewel deze verbetering verdwijnt bij de laagste verlichtingsniveaux. De hoekvergroting van het instrument leidt bovendien tot een verkleining van het beeldveld, terwijl volledige adaptatie van het oog essentieel blijft.

Een fundamenteel betere oplossing in dit opzicht kan alleen worden bereikt door electronische hulpmiddelen toe te passen.

Passieve Electronische Nachtkijkers

Twee totaal verschillende typen van electronische nachtkijker kunnen deze rol vervullen, beide van „passieve" aard, d.w.z. dat ze werken zonder extra bijbelichting van het nachtelijk terrein. Het eerste type maakt gebruik van het sterrelicht dat wordt gereflecteerd door de voorwerpen in het terrein, en werkt dus op soortgelijke wijze als het oog. Het instrument kan echter meer photonen opvangen van de scene, en kan deze bovendien meer efficient registreren. Dit soort instrument maakt in het algemeen gebruik van een beeldversterkerbuis, schematisch aangegeven in figuur 2.

De scene wordt via een objectief afgebeeld op de photokathode van de buis, waar gedetecteerde photonen aanleiding geven tot de emissie van photo-electronen. Het electrische veld in de buis versnelt en focusseert de electronen, die worden vrijgemaakt op een klein element van de photokathode, op een corresponderend element van het fluorescentiescherm, waar ieder electron

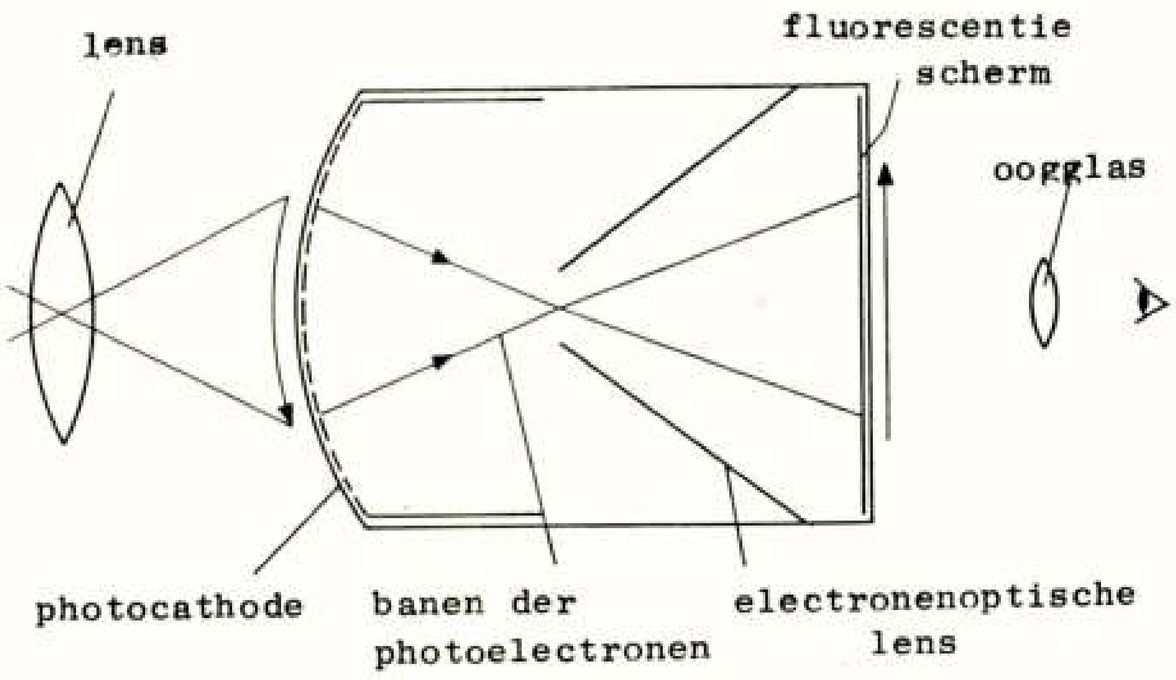


Fig. 2. Schematische afbeelding van een enkelvoudige beeldversterkerbuis.

wordt omgezet in een groot aantal photonen. Op deze wijze wordt een uitgangsbeeld opgebouwd met aanzienlijk grotere helderheid.

Het andere type nachtkijker maakt gebruik van de natuurlijke warmtestraling van de scene met behulp van een warmtebeeldtransformator. De golflengte van deze straling is veel langer dan zichtbaar licht, met een maximale intensiteit in de buurt van 10 µm, en maar heel weinig beneden 2 µm. Het is daarom niet mogelijk deze straling om te zetten in zichtbaar licht via de photokathode van een beeldversterkerbuis.

De aantallen photonen waar men in dit geval mee te doen heeft, zijn alleen afhankelijk van de temperatuur van het object, en zijn in het algemeen zo groot dat de statistische fluctuaties niet langer een rol spelen. Het grootste probleem is hier echter, dat de effectieve „black-body"-temperatuur van de verschillende natuurlijke objecten in de nachtelijke scene maar heel weinig varieert (in de grootte orde van ongeveer 1°C). Dit geeft aanleiding tot een zeer gering contrast.

Een 2-dimensionaal detectiescherm, dat bestaat uit een groot aantal kleine detectorcelletjes, kan dientengevolge heel gemakkelijk leiden tot een ernstig „vuile-ruit" effect, als de individuele celletjes een klein verschil in gevoeligheid bezitten. De eenvoudigste manier om deze moeilijkheid te voorkomen, is het gebruik van een enkele detectorcell, waar het optische beeld mechanisch overheen wordt bewogen. Hoewel het vuile-ruit effect zodoende volledig wordt vermeden, wordt de warmtestraling zeer oneconomisch gebruikt. Bovendien vergt deze methode zeer snelle mechanische lijn-en beeldaftasting.

Om deze redenen wordt tegenwoordig liever gebruik gemaakt van lineaire rijen van detectorelementjes, waar het warmtebeeld eens, of in een beperkt aantal gedeeltelijke aftastingen, overheen wordt bewogen voor iedere volledige aftasting van één beeld. Daar het aantal celletjes in dit geval beperkt blijft tot hoogstens een paar honderd, is het nog mogelijk de detectoren vóór te selecteren voor geringe gevoeligheidsvariaties, òfwel hiervoor te corrigeren.

Op deze wijze is het mogelijk een zeer bruikbaar warmtebeeld te vormen van het nachtelijk terrein, onafhankelijk van de belichting, met een oplossend vermogen in het beeld van ongeveer 400 lijnen en met een temperatuurgevoeligheid van ongeveer 0,1°C. Dit kan bijv. worden bereikt met een rij van 400 celletjes CdHgTe of PbSnTe, ter grootte van 60 µm, bij 77°K.

In het algemeen is het echter moeilijker de warmtebeelden te interpreteren, afgezien van bepaalde voorwerpen in het terrein waarin men speciaal geinteresseerd kan zijn, zoals menselijke lichamen of warme motoren van voertuigen, die zich als bakens kunnen voordoen.

De apparatuur, aan de andere kant, is echter in het algemeen veel gecompliceerder, duurder, en heeft koeling en mechanische aftasting nodig. Als het alleen gewenst is de „hete objecten" in het terrein te lokaliseren, kan veel eenvoudiger en goedkopere apparatuur worden gebruikt, gebaseerd op één, of slechts een paar, celletjes in combinatie met een beeldversterker.

Deze voordracht zal zich verder alleen bezig houden met beeldversterkers, gebaseerd op het gebruik van gereflecteerd hemellicht.

Beeldversterkers

Een beeldversterker kan volgens formule (1) in principe een verbetering opleveren met behulp van een van de volgende maatregelen:

1. Vergroot de doorsnede van het objectief (D), zonder dat in dit geval het gezichtsveld evenredig verkleind dient te worden.
2. Verleng de integratietijd (τ). De begrenzing is hier uiteindelijk de toelaatbare beeldvervaging van bewegende objecten.
3. Gebruik de aanwezige photonen meer economisch door het toepassen van photokathoden met maximale quantum gevoeligheid (grotere θ), en beter aangepast aan de spectrale verdeling van het licht van de nachtelijke hemel (grotere P), waarvan de piek ligt in het nabije infrarood. Voor dit doel wordt tegen woordig meestal gebruik gemaakt van photokathoden van het type S25, terwijl men probeert de nog nieuwere kathoden met negatieve electronenaffiniteit, zoals GaAs, hiervoor geschikt te maken.

4. Tenslotte is het in principe ook mogelijk het contrast C kunstmatig te vergroten in het beeld, door het gebruik van een televisieketen met gammacorrectie en manipulatie van het zwartniveau.

Met behulp van dergelijke beeldversterkers is het zodoende mogelijk een aanzienlijk beter nachtelijk waarnemingsvermogen te realiseren, met een verbeteringsfactor die maximaal het product is van de individuele verbeteringen in de zojuist genoemde eigenschappen. Mits het instrument voldoende helderheidsversterking bezit, en geen storend eigen achtergrondlicht opwekt, wordt de enige begrenzing voor de laagste lichtniveaux gevormd door de photonenruis. Het is hiervoor nodig dat een photoelectron uiteindelijk zoeveel photonen veroorzaakt op het fluorescentiescherm van de beeldversterkerbuis, dat een registratie volgt op het netvlies van de waarnemer die het beeld op dat scherm bekijkt. Bovendien moet de donkerstroom in de buis verwaarloosbaar zijn.

Het is mogelijk aan deze voorwaarden te voldoen met een enkelvoudige beeldbuis met één versterkingstrap. Zo een buis heeft echter het nadeel dat de helderheidsversterking niet voldoende is om de donkeradaptatie van het oog van de waarnemer overbodig te maken. Bovendien kan de benodigde tijdsduur voor het maken van een nuttige waarneming aanzienlijk korter zijn bij een hogere schermhelderheid. Om deze redenen is het in de praktijk gebleken nodig te zijn een grotere helderheidsversterking toe te passen dan kan worden bereikt met een eenvoudige ééntraps-beeldversterkerbuis.

Meertrapsbuizen

Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van meertraps-buizen, die het eenvoudigst kunnen worden verkregen door een aantal (bijv. 3) enkelvoudige buizen optisch te koppelen via hun in - en uitgangsvensters met behulp van vezeloptiek. Een dergelijke opstelling is aangegeven in figuur 3.

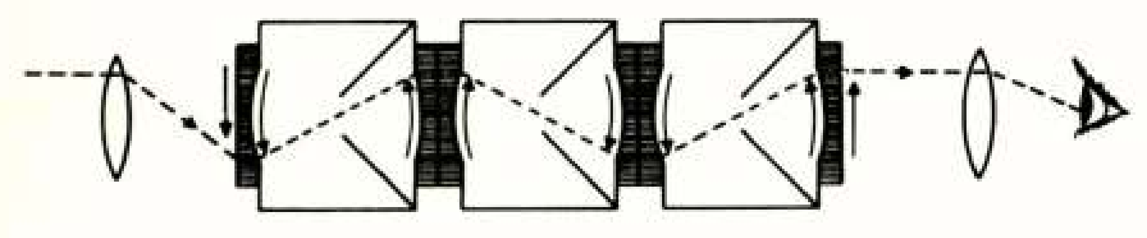


Fig. 3. Schematische opstelling van een 3-trapsbuis, aan elkaar gekoppeld via vezeloptiek.

Dit soort beeldversterkerbuizen, compleet met de hoogspanningsschakeling aangebracht rondom de buis, afgebeeld in Figuur 4, zijn nu in massaproductie.

Ze hebben slechts een klein droog batterijtje en een oscillator nodig, tezamen met een inhoud van slechts een paar cm^3, om een compleet

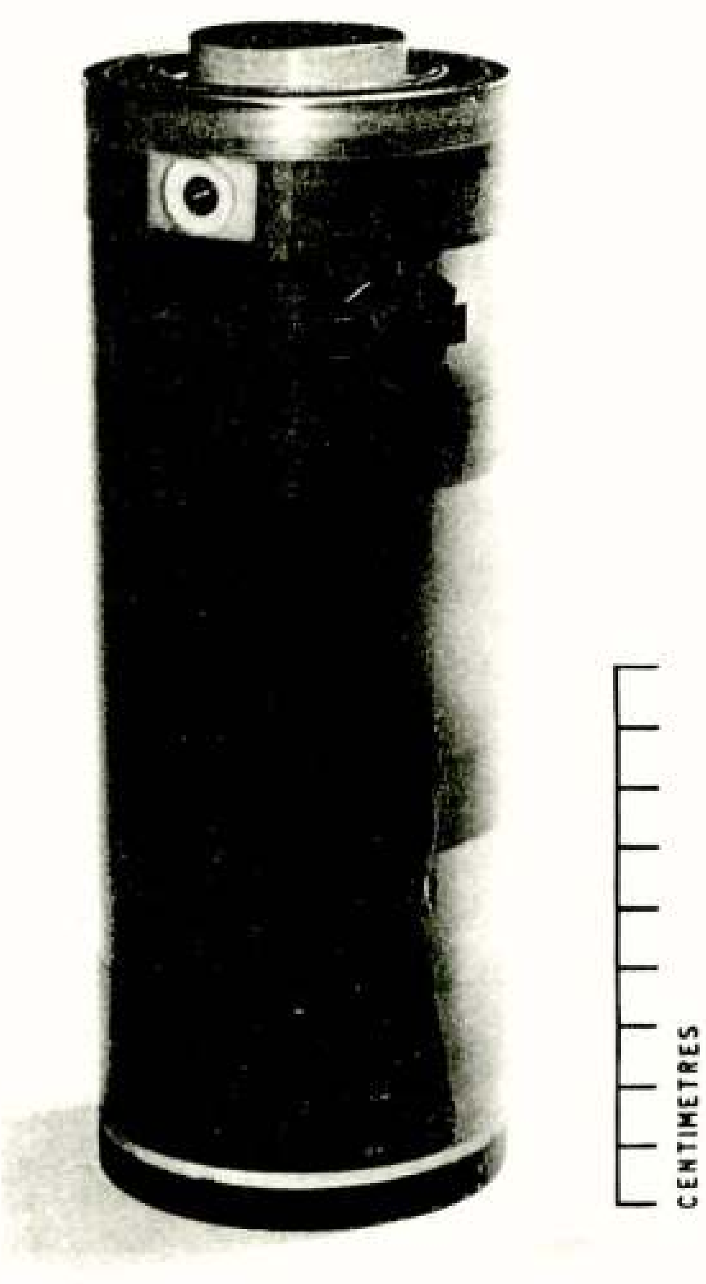


Fig. 4. Photo van een 3-trapsbuis, compleet met hoogspanningsschakeling rondom de buis.

beeldversterkerspakketje te vormen met een helderheidsversterking van meer dan 50.000. Deze aanpak brengt echter ook nadelen mee. Er is bijvoorbeeld een automatische achteruitgang van de modulatieoverdracht door het gebruik van drie versterkingstrappen, en een toename in gewicht, afmetingen en prijs, vergeleken met een ééntrapsbuis.

Buizen met Kanaalplaatversterking

Om deze redenen zijn dan ook pogingen in het werk gesteld om veel grotere helderheidsversterking te bereiken met een enkelvoudige beeldbuis. Dit is uiteindelijk gelukt met behulp van het effect van electronenvermenigvuldiging in kanaaltjes, geillustreerd in figuur 5, waar één kanaaltje is geschetst.

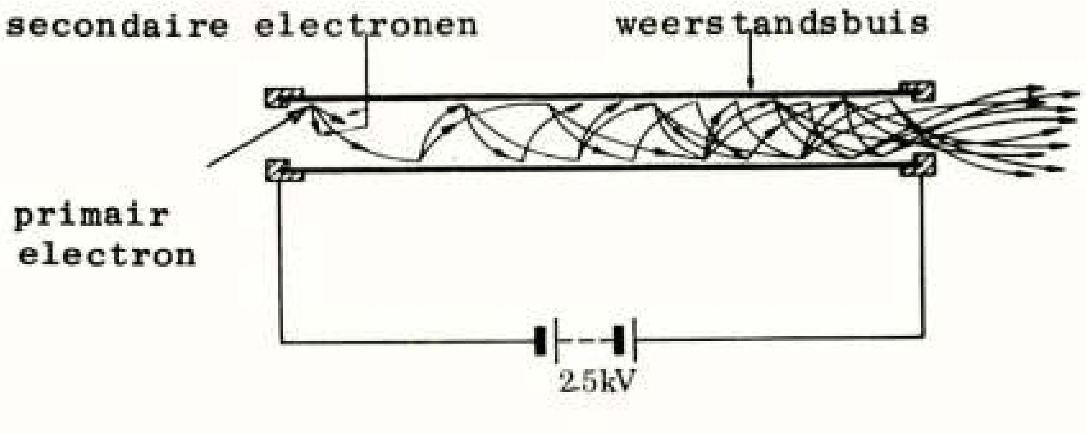


Fig. 5. Illustratie van het principe van kanaal-electronen vermenigvuldiging.

Zo een kanaaltje bestaat gewoonlijk uit een glas met een geringe electronengeleiding, of uit een

glas met een materiaal dat inwendig bekleed is met een dun laagje van zo een glas. Electroden aan de beide uiteinden van het kanaaltje zorgen voor een electrisch veld in de lengterichting. Electronen die binnenkomen aan de zijde van de kathode en de binnenwand treffen, maken daar secondaire electronen vrij. Deze worden door het electrische veld verder binnen het kanaaltje getrokken, en treffen de overkant bij een hogere potentiaal, zodoende meer secondaire electronen vrij makend. Verdere herhalingen van dit proces zorgen ervoor dat één electron, dat een kanaaltje binnenkomt, aanleiding kan geven tot het uittreden van een groot aantal electronen binnen een zeer korte tijd aan de uitgang. De vermenigvuldigingsfactor hangt af van de verhouding van de lengte tot doorsnede van het kanaaltje, van het aangebrachte potentiaalverschil, en van de secondaire emissie coefficient van de wandbekleding. Versterkings-factoren tot ongeveer 10^8 kunnen in de praktijk worden bereikt met enkelvoudige kanaaltjes, voordat wand - of ruimtelading het electrische veld vervormt en pulsverzadiging veroorzaakt.

Aangezien de versterking afhankelijk is van de verhouding van de dimensies en niet van de afmetingen zelf, kunnen de kanaaltjes zeer klein worden gemaakt en worden samengebundeld in de vorm van een mozaiek of „kanaalplaat". Een photo van een gedeelte van zo een kanaalplaat is weergegeven in figuur 6.

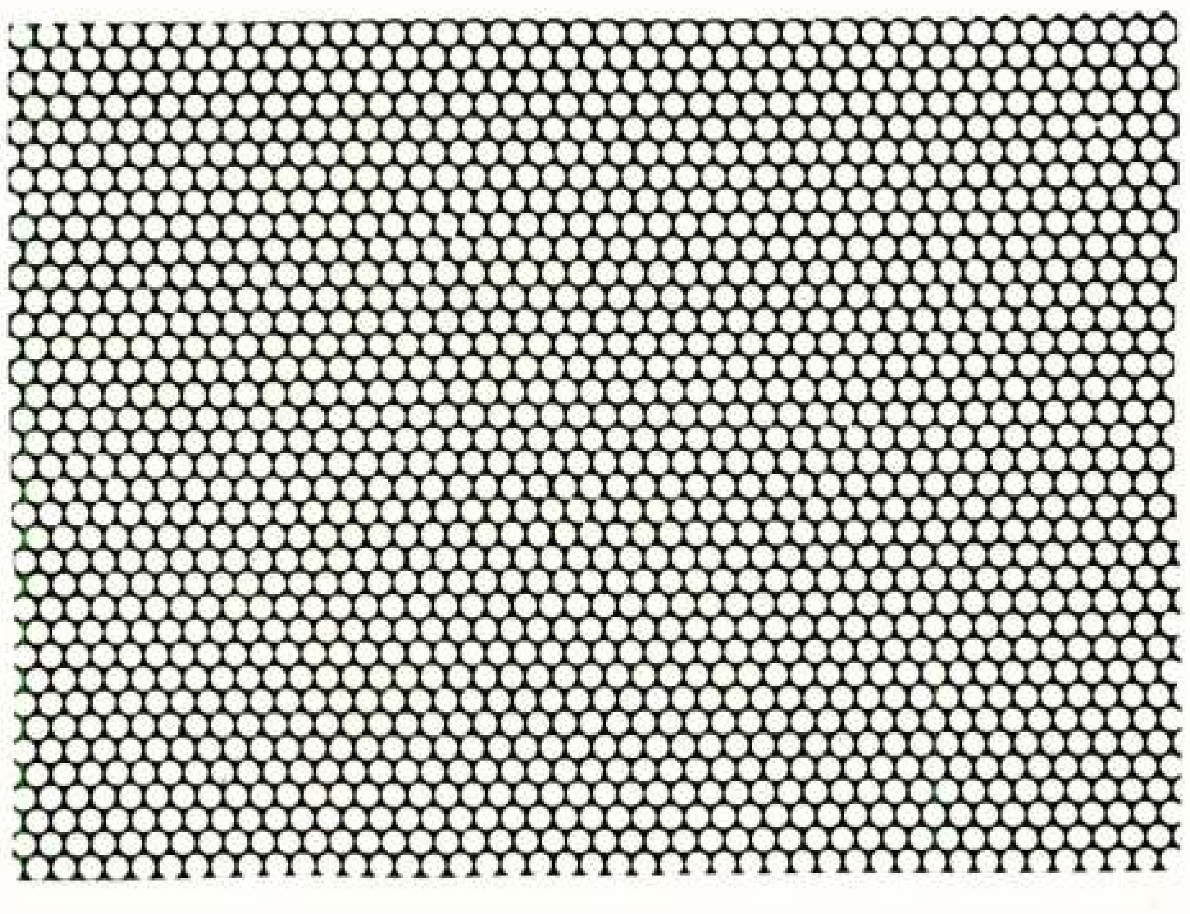


Fig. 6. Photo van een gedeelte van een kanaalplaat.

Door zo een kanaalplaat te plaatsen tussen de photokathode en het fluoresentiescherm van een beeldbuis, en de photoelectronen op deze wijze sterk te vermenigvuldigen, kan gemakkelijk een grotere helderheidsversterking worden verkregen met een enkelvoudige beeldbuis, dan met een normale 3-trapsbuis.

Figuur 7 geeft schematisch de twee typen buis aan die hiervoor kunnen worden ontworpen. De ene maakt gebruik van een electronlens die een omgekeerd beeld van de kathode vormt op de kanaalplaat, terwijl de electronen die uit de kanaalplaat treden rechtstreeks worden overgetrokken naar het fluorescentiescherm in het hogene veld tussen de kanaalplaat en het op zeer korte afstand hiervan verwijderde scherm. Dit soort beeldversterkerbuis is bekend als „inverter". Het andere type maakt ook aan de kathodezijde gebruik van een zeer korte afstand tussen kathode en kanaalplaat, waarbij de photoelectronen rechtstreeks worden overgetrokken. Het beeld op het scherm is dus niet omgekeerd en dit type buis is bekend als „wafer-", of „proximity-" buis.

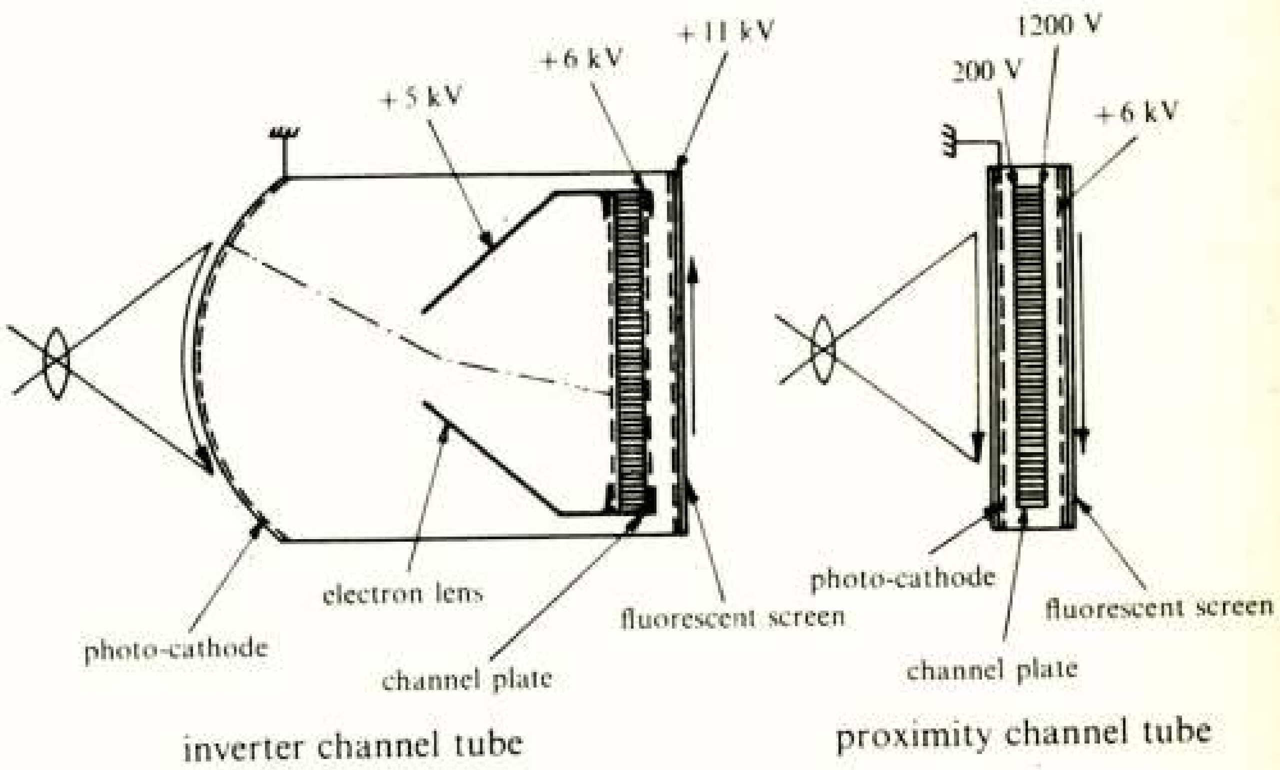


Fig. 7. Twee mogelijke toepassingen van het principe van kanaal-electronenvermenigvuldiging in een beeldversterkerbuis

Voor een eenvoudige beeldversterker, met een optisch omkerend objectief en een rechtziend oogglas, heeft de „proximity-"buis een extra optische omkering nodig. Dit kan vrij eenvoudig worden bereikt door een beelddraaiing toe te passen in het vezeloptische uitgangsvenster van de buis. Een „inverter-"buis heeft deze extra omkering niet nodig.

Het nadeel van een beeldbuis met kanaalversterking is dat een gedeelte van de photoelectronen verloren raakt in het vermenigvuldigingsproces, bijv. door de vaste voorkant van de kanaalplaat te treffen. Bovendien kunnen de statistische eigenschappen van de vermenigvuldiging aanleiding geven tot een exponentiele pulshoogteverdeling. Beide aspecten komen overeen met een effectieve reductie in de quantumopbrengst van de buis, (kleinere θ) zodoende leidend tot een verkleind waarnemingsvermogen bij de laagste lichtniveaux. Dit verlies kan echter in principe weer grotendeels worden vergoed door het gebruik van een phosphor met langere nalichttijd (grotere τ). Zulke phosphoren hebben in het algemeen een lagere lichtopbrengst en kunnen daarom niet zo gemakkelijk gebruikt worden voor gewone beeldbuizen met hun geringere helderheidsversterking.

Belangrijke voordelen van de kanaalversterking zijn echter: de betere modulatieoverdracht (speciaal voor de „inverter") en de reductie in gewicht, afmetingen en prijs vergeleken met de 3-traps buis. Een verder zeer belangrijk voordeel is de verzadiging van de kanaalversterking voor zeer heldere objecten, die zodoende kunnen worden waargenomen zonder dat zij hun omgeving volledig overstralen in het beeld.

Televisie Bij Lage Lichtniveaux

Voor televisie bij lage lichtniveaux gelden soortgelijke beperkingen als voor direct-zicht, namelijk photonenruis en modulatie overdracht. In dit geval kan het aftasten echter extra beperkingen met zich meebrengen in deze opzichten, terwijl bovendien traagheidseffecten een rol kunnen spelen. Hoewel afmetingen, gewicht en prijs in het algemeen groter zijn bij de televisie toepassing, heeft deze ook enkele belangrijke voordelen over de eenvoudiger direct-zicht toepassingen, zoals bijvoorbeeld:

1. de flexibiliteit van het zien op afstand, en het gelijktijdig zien met meerdere waarnemers,
2. de mogelijkheid het videosignaal te bewerken om het contrast te vergroten, door gamma-correctie toe te passen of het zwartniveau te verleggen,
3. de integratietijd te varieren,
4. de beeldhelderheid en versterking eenvoudig te varieren,
5. het waarnemen van een beeld met beide ogen op een kathodestraalbuis in plaats van door een oogglas met optische vergroting en beperkte uittree-pupil.

Het belangrijkste is de noodzaak om photo-electronenvermenigvuldiging toe te passen vóór het aftasten. Dit kan worden bereikt met een aantal verschillende buistypen, die slechts tot kleine variaties in waarnemingsvermogen leiden.

Voor draagbare nachtkijkerapparatuur zijn afmetingen en gewicht uitermate belangrijk. Het meest belovende recente voorbeeld van een enkelvoudige zeer gevoelige opneembuis voor televisie is de Silicium-versterker-buis, al of niet met nog een extra beeldversterker-buis ervoor geschakeld, en schematisch aangegeven in figuur 8.

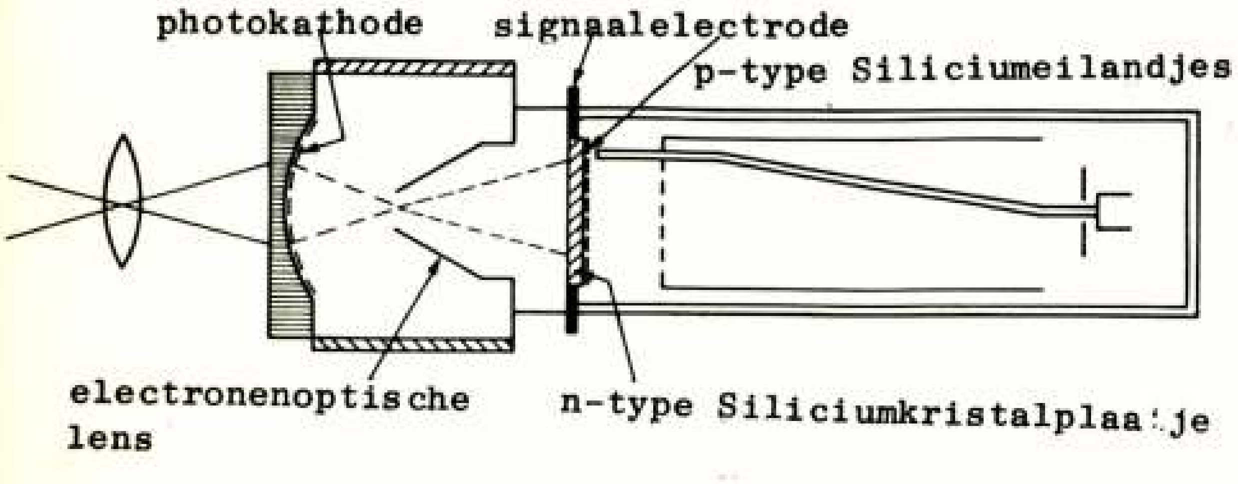


Fig. 8. Schematische afbeelding van een Silicium-versterkeropneembuis.

Deze buis is in principe vergelijkbaar met een vidicon dat een dunne trefplaat bevat van éénkristallig Silicium, ongeveer 10-15 µm dik. Op het oppervlak van de trefplaat zijn een groot aantal p-n barrières aangebracht, die worden afgetast met een electronenbundel, op dezelfde wijze als in een vidicon. De andere zijde van de trefplaat wordt gebombardeerd door de photoelectronen van het beeldversterker-compartiment. Deze photoelectronen treffen het Silicium met een energie van ongeveer 10keV en produceren zodoende een paar duizend ladingsdragers, die over de p-n barrières heen naar de andere zijde van de trefplaat kunnen diffunderen, waar hun lading kan worden verwijderd door de aftastende electronenbundel.

Een aantrekkelijke alternatieve oplossing is de combinatie van een kanaalplaat-beeldversterkerbuis, optisch gekoppeld met een normale camerabuis. Een dergelijke opstelling heeft, zonder klaarblijkelijk verlies van waarnemingsvermogen, de belangrijke eigenschap van het onderdrukken van de hoge lichtpunten, en vormt waarschijnlijk de goedkoopste apparatuur als de koppeling plaats vindt met behulp van een eenvoudige lens tot een standaard vidicon of plumbicon camerabuis.

Zoals U ziet, is de „noctovisor" van 1928 nu gerealiseerd in de praktijk. Het is mogelijk dat dit soort instrument in de toekomst nog kleiner zal worden door het gebruik van 2-dimensionale opstellingen van detectiecelletjes, elk met hun eigen geintegreerde versterkerschakeling, in een platte beeldversterker volledig uitgevoerd in de vaste stof

De „science fiction", aan de andere kant, gaat alweer verder door bijvoorbeeld vensters te suggereren, bestaande uit een laser-materiaal dat de lichtstralen versterkt terwijl zij erdoor vallen. Dit zou de nacht tot dag kunnen maken voor ieder die door zo een venster keek, of door een bril voorzien van dit soort „glas". Het ziet er echter naar uit dat het weleens een verdere 45 jaar zou kunnen duren voor deze „science fiction" eveneens gerealiseerd zal worden.

Hoe dat ook zij, de practisch verwezenlijkte apparaten, waarover ik vandaag heb gesproken, tonen aan dat de mens er nu al heel behoorlijk in is geslaagd een van zijn natuurlijke begrenzingen aanzienlijk te verschuiven.

Literatuur:

BLACKWELL, H.R., 1946, J. Opt. Soc. Am. 36, 624.

PIRENNE, M.H., MARRIOTT, F.H.C., & O'DOHERTY, E.F., 1957, Spec. Rep. Ser. Med. Res. Coun. no. 294.

ROSE, A., 1942, Proc. I.R.E., 30, 295.

SCHAGEN, P., 1971, Phil. Trans. of the Royal Society, 269, 233.

DE VRIES, H., 1943, Physica 10, 553.

Voordracht gehouden op 22 februari 1974 in het Nat. Lab. der N.V. Philips Gloeilampenfabrieken te Eindhoven, tijdens werkvergadering no. 235.

NIEUWE OPTISCHE SYSTEMEN VOOR WAARNEMING BIJ NACHT

Ir. T. Bakker
Physisch Laboratorium TNO

In dit artikel worden de beperkingen beschreven, die door de eigenschappen van de atmosfeer gesteld worden aan de toepassing van helderheidsversterkers voor waarneming bij nacht. Vervolgens worden het principe en de eigenschappen beschreven van twee nieuwe waarnemingssystemen, nl. het gated-viewing systeem en het laser-radarsysteem.

BEPERKINGEN VAN DE HELDERHEIDSVERSTERKER

Om een voorwerp met gegeven afmetingen met behulp van een helderheidsversterker waar te kunnen nemen is bij een bepaalde helderheid van het tafereel een minimaal contrast tussen het voorwerp en zijn directe omgeving vereist.[2] Het contrast, dat in het beeld op het fosforscherm wordt waargenomen, wordt bepaald door:

1e Het contrast, dat in het tafereel ter plaatse van het voorwerp aanwezig is.

2e Het verlies in contrast, dat optreedt in de atmosfeer.

3e Het verlies in contrast, dat optreedt in de helderheidsversterker.

In de nu volgende paragraaf wordt het onder 2e genoemde contrastverlies met de daaruit volgende consequenties nader bekeken.

Contrastverlies in de atmosfeer

Om de waarneming van een voorwerp met behulp van een helderheidsversterker mogelijk te maken is een minimale helderheid B_v van het voorwerp noodzakelijk; in het absolute donker ziet men ook met een helderheidsversterker niets. De noodzakelijke verlichting is afkomstig van maan, sterren en andere lichtbronnen aan de hemel. Deze straling valt door de atmosfeer heen op het tafereel. Een gedeelte van deze straling wordt verstrooid in de richting van de waarnemer. Het gevolg is, dat het op een afstand S waargenomen contrast C(s) aanzienlijk kleiner kan zijn dan het contrast C(o) ter plaatse van het voorwerp(zie fig. 1).

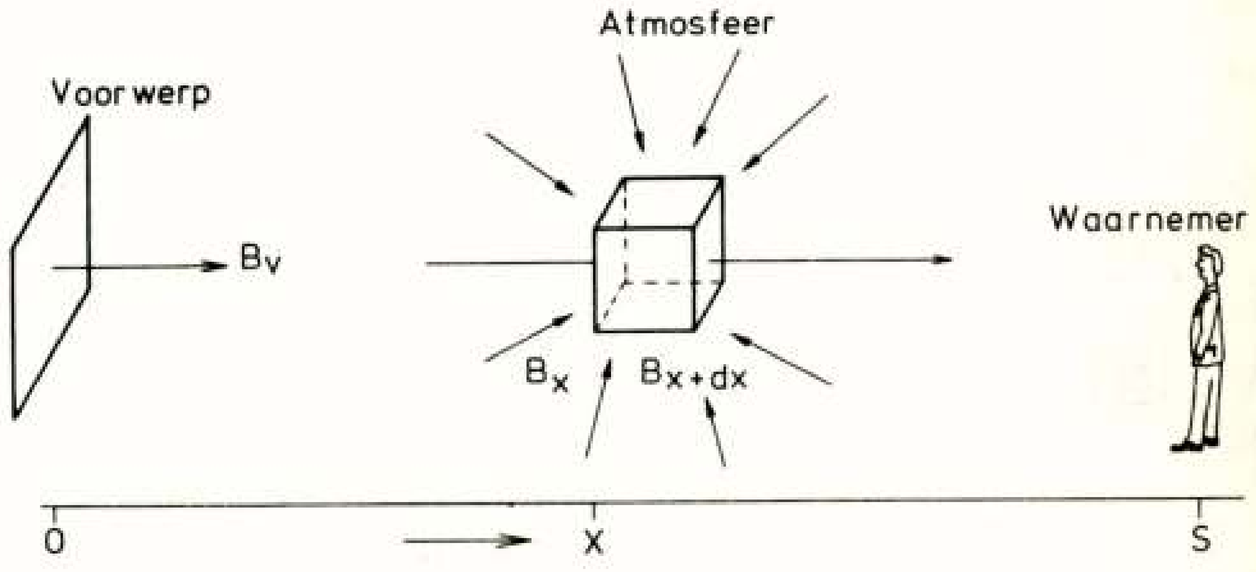


Fig. 1. Contrastverlies in de atmosfeer

$$C(o) = \frac{B_v - B_o}{B_v + B_o}$$

B_v = helderheid van het voorwerp

B_o = helderheid van de omgeving van het voorwerp

Door het Physisch Laboratorium is een uitgebreid onderzoek ingesteld naar de grootte van het optredende contrastverlies in de atmosfeer[3]. Als maat is hierbij gehanteerd de afstand $S_{\frac{1}{2}}$, waarover het aanvangscontrast C(o) tot de helft van de oorspronkelijke waarde is gereduceerd. In fig. 2 is een histogram getekend, waarin langs de verticale as is aangegeven gedurende welk percentage van de nachtelijke tijd de gemeten waarde van $S_{\frac{1}{2}}$ gelegen is tussen de langs de horizontale as gespecificeerde waarden. De meetperiode bedroeg 1 jaar.

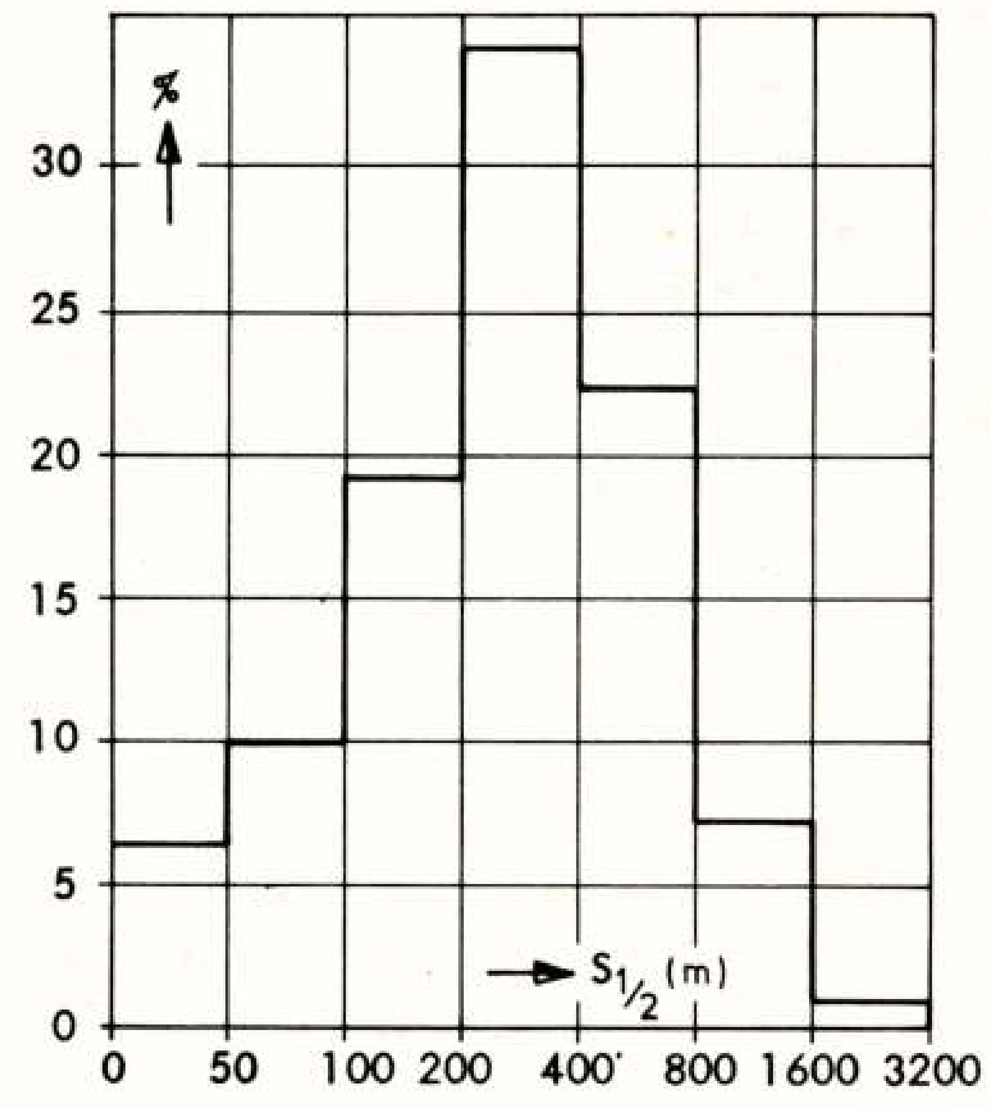


Fig. 2. Histogram van $S_{\frac{1}{2}}$, ref.3

We zien, dat gedurende 50% van de tijd $S_{\frac{1}{2}}$ kleiner is dan 400 m. Aangezien men aan kan nemen, dat voor niet te grote voorwerpen in de helderheidsversterker zelf ook nog eens een contrastverlies met een factor 2 optreedt, is voor voorwerpen met een niet te groot aanvangscontrast ($C_o \leqq 20\%$) $S_{\frac{1}{2}}$ een reële maat

voor het maximale bereik van een helderheidsversterker. Daar het hier een beperking betreft, die door de atmosfeer gesteld wordt is geen substantiële verbetering te verwachten van een verbeterde constructie van de helderheidsversterker en/of de toegepaste optiek.

HET GATED-VIEWING SYSTEEM

Bij dit systeem wordt een geschakelde helderheidsversterker als ontvanger toegepast in combinatie met een gepulste laser als zender. In fig. 3 wordt het principe nader toegelicht. Op het moment,

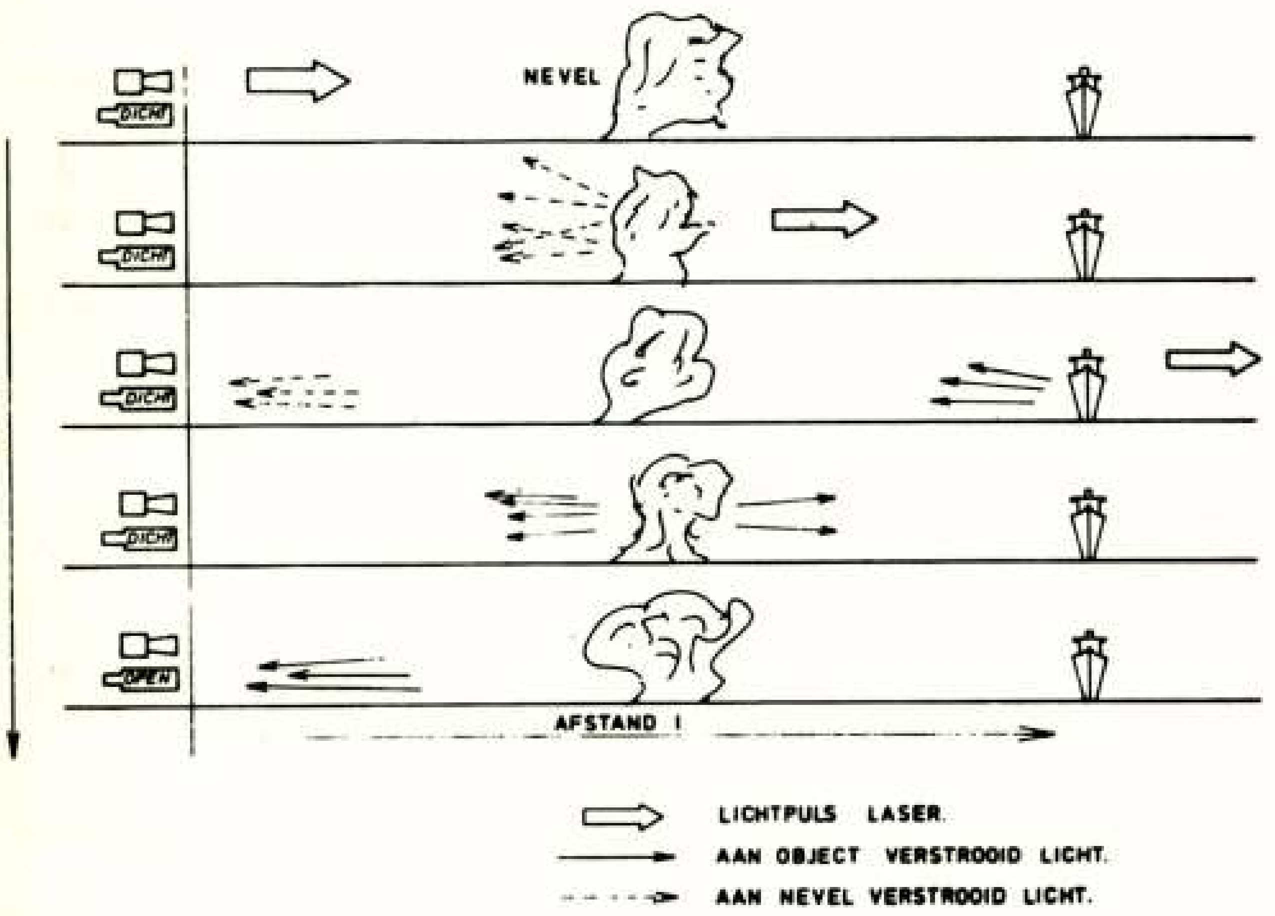


Fig.3. Principe van een gated-viewing systeem

dat de laserpuls wordt uitgezonden is de helderheidsversterker dichtgeschakeld. Zodoende heeft men geen last van de straling die op een korte afstand voor de ontvanger door de atmosfeer wordt teruggestrooid. Enige tijd τ nadat de laserpuls is uitgezonden wordt de helderheidsversterker gedurende τ_o seconden opengeschakeld. Gedurende deze τ_o seconden ontvangt de helderheidsversterker straling die gereflecteerd wordt door een strook terrein met een diepte Δl, gelegen op een afstand $l = \frac{1}{2}c\tau$. De grootte van Δl wordt bepaald door de waarden van τ_o en de duur τ_z van de laserpuls. Door de vertragingstijd τ te varieren doorloopt men het tafereel successievelijk in de diepte. Het waargenomen gebied is in fig. 4 gearceerd aangegeven. De waargenomen verlichtingssterkte $I(l)$ op een afstand l in het terrein is bij gegeven vertragingstijd τ:

$$I(l) = V(l)\int_{\tau}^{\tau+\tau_o} Z(t - \frac{2l}{c})\, O(t)dt$$

$V(l)$: verliezen, o.a. t.g.v. atmosferische extinctie

$Z(t)$: vorm van de laserpuls

$O(t)$: vorm van de versterking van de helderheidsversterker

Voor rechthoekige pulsvormen $Z(t)$ en $O(t)$ is de waargenomen verlichtingssterkte getekend in fig. 5.

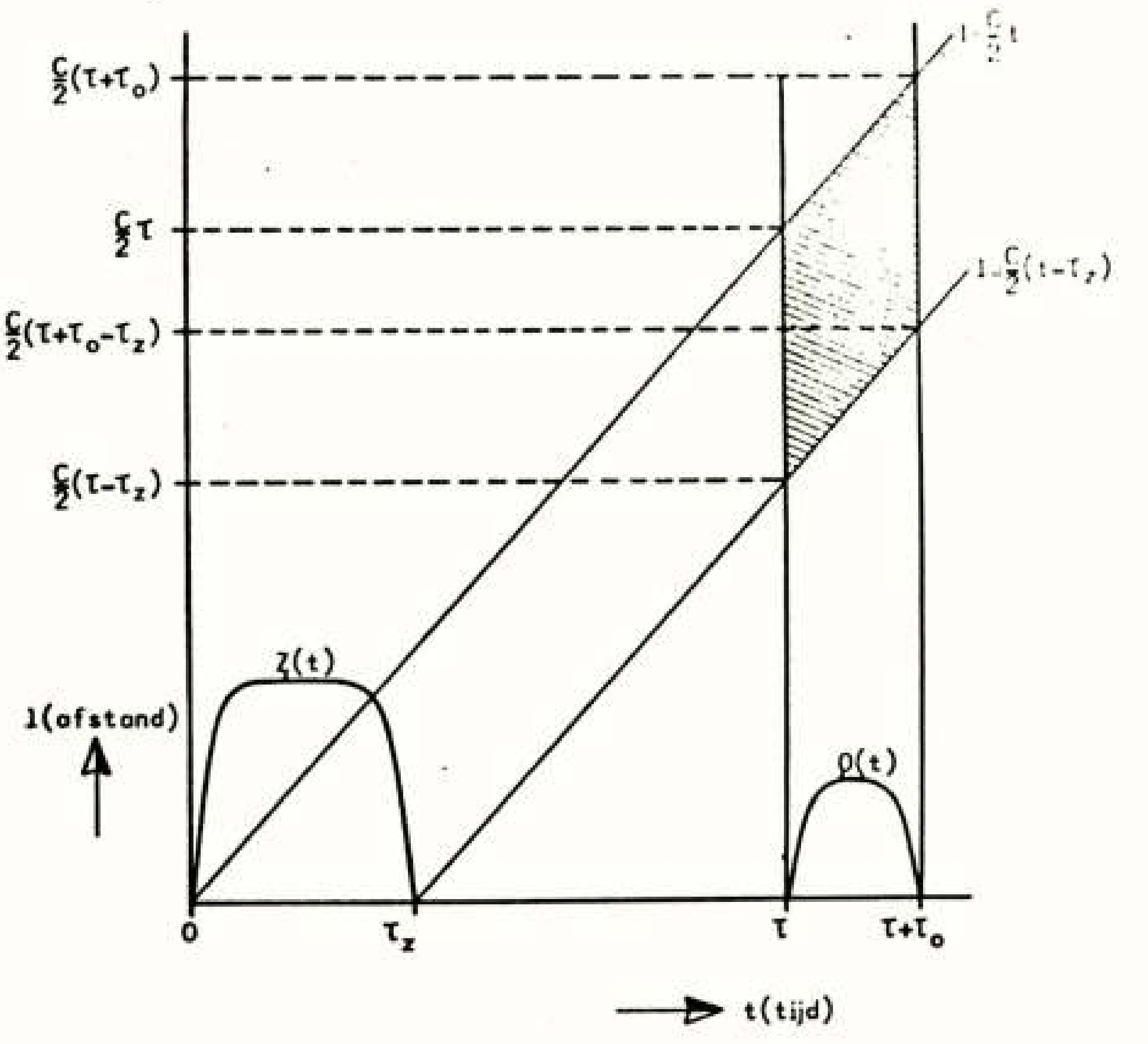


Fig.4. Schematische voorstelling van gated-viewing

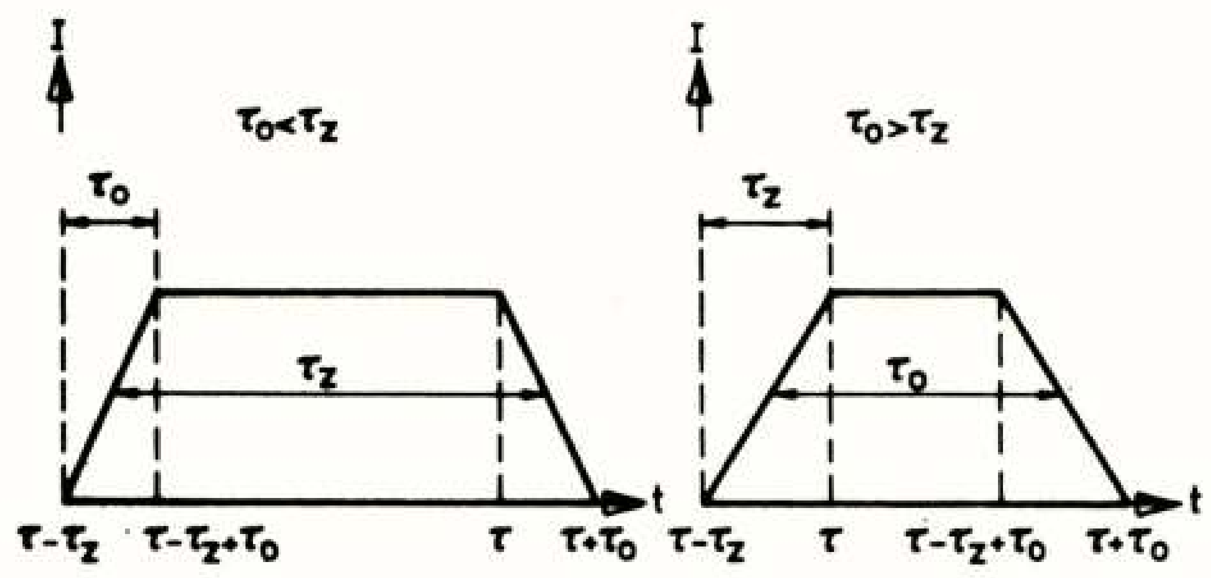


Fig.5. Waargenomen verlichtingssterkte voor rechthoekige pulsvormen

De afstand waarover de verlichtingssterkte stijgt en daalt wordt bepaald door de kortste puls. De halfwaarde breedte van de lichtverdeling in het terrein wordt bepaald door de langste puls.

Voordelen van het gated-viewing systeem

Het gated-viewing systeem heeft de volgende voordelen:

1 Het contrastverlies t.g.v. alle statische lichtbronnen vermindert evenredig met de duty-factor δ van de geschakelde helderheidsversterker. Wanneer diode lasers worden toegepast als gepulste lichtbron is δ ongeveer 10^{-2} (repetitiefrequentie 20 kHz, pulsduur 0,5 µs). Wanneer gepulste vaste-stoflasers of kleurstoflasers worden gebruikt bedraagt δ ca 10^{-5}. In dat geval kan men met behulp van enige additionele filters dit systeem ook overdag gebruiken.

Het contrastverlies wordt bepaald door de straling, die door de atmosfeer in de waargenomen terreinstrook wordt terugverstrooid.

2 Wanneer de vertragingstijd τ zo gekozen wordt, dat deze overeenkomt met afstanden in het terrein, die groter zijn dan die tot het voorwerp, ziet men dit voorwerp in silhouet tegen een verlichte achtergrond. Op deze wijze kan men zelfs contrastvergroting verkrijgen.

3 Door de vertragingstijd τ te meten kan men de afstand tot het waargenomen voorwerp bepalen .

4 Het is in principe mogelijk om voorwerpen door niet té dichte nevels waar te nemen. (zie fig.3)

Experimenteel gated-viewing systeem

In het kader van de Duits-Nederlandse samenwerking op het gebied van nachtzien is een experimenteel, mobiel gated-viewing systeem geconstrueerd, zie fig.6. In eerste instantie werd een door Duitsland ter beschikking gestelde 3-traps helderheidsversterker toegepast. Hoewel de eerste trap een tetrode is, die geschakeld kan worden, is deze helderheidsversterker voor een totaal ander doel ontwikkeld. In een later stadium is ook een microkanaalversterker (I.T.T. 18 mm) toegepast.

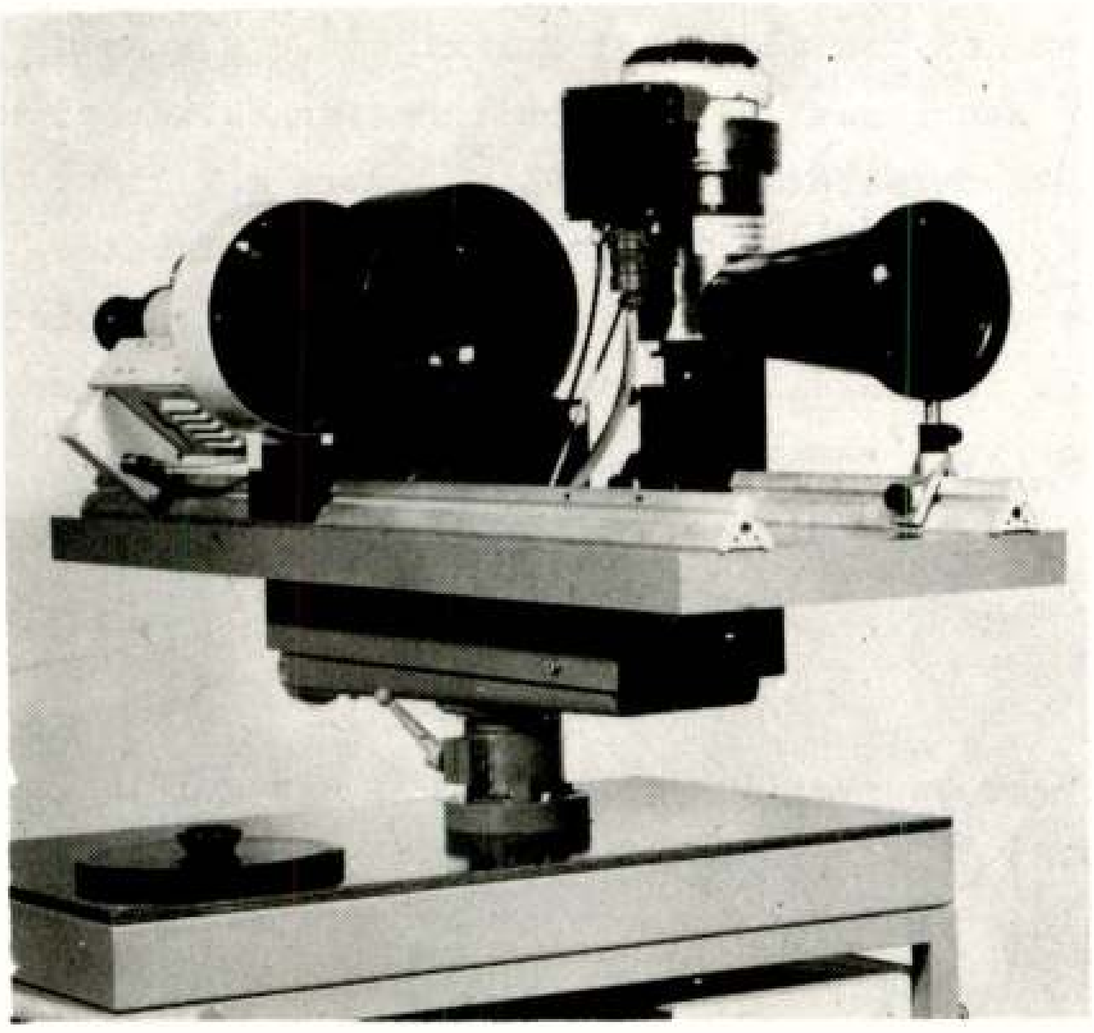


Fig.6. Opbouw van een gated-viewing systeem

Als zender zijn laser-diode arrays van Gallium-Arsenide, fabrikaat RCA, type TA 7790 toegepast. Bij een temperatuur van 77 K, een pulsherhalingsfrequentie van 20 kHz, een pulsduur van 0,5 µs is het gemiddelde vermogen, dat door twee van deze arrays wordt uitgestraald 2,2 W. De golflengte van de uitgezonden straling is 850 nm. Een homogene bundel wordt verkregen door integratie in een vlak voor de diodes geplaatst rechthoekig glazen blok met een doorsnede van 5x14 mm en een lengte van 25 mm. De spreiding van de bundel is 1,2° in de verticale richting en 3,3° in de horizontale richting. De laser-diode arrays en het glazen blok zijn in een stalen Dewar gemonteerd. Omdat het rendement van de laser diodes groot is (~30%) is de warmteontwikkeling betrekkelijk gering.

Als ontvanger is een spiegeloptiek (fabrikaat "de Oude Delft") gebruikt. De diameter is 0,2 m en de brandpuntsafstand is 0,25 m. De z.g. "field-stop" T=2,2. De berekende waarde van de modulatie overdrachtsfunctie voor monochromatische straling met een golflengte van 850 nm op de as van het systeem is ~ 90% bij 10 lp/mm en ~ 70% bij 20 lp/mm.

Een speciale mogelijkheid van het elektronische systeem is, dat men m.b.v. een enkele schakelaar in enkele seconden kan overgaan van passieve naar actieve waarneming en omgekeerd.

Experimentele resultaten

De belangrijkste eigenschappen van het systeem zijn:

1e Het verschil in waargenomen contrast tussen de actieve en de passieve mode

2e Het bereik van het systeem

3e Het scheidend vermogen van het systeem

4e De nauwkeurigheid in de afstandmeting

De afhankelijkheid van deze grootheden van de atmosferische condities moet gemeten worden. In dit verband zijn "long-term" meetprogramma's binnen de genoemde Duits-Nederlandse samenwerking gepland.

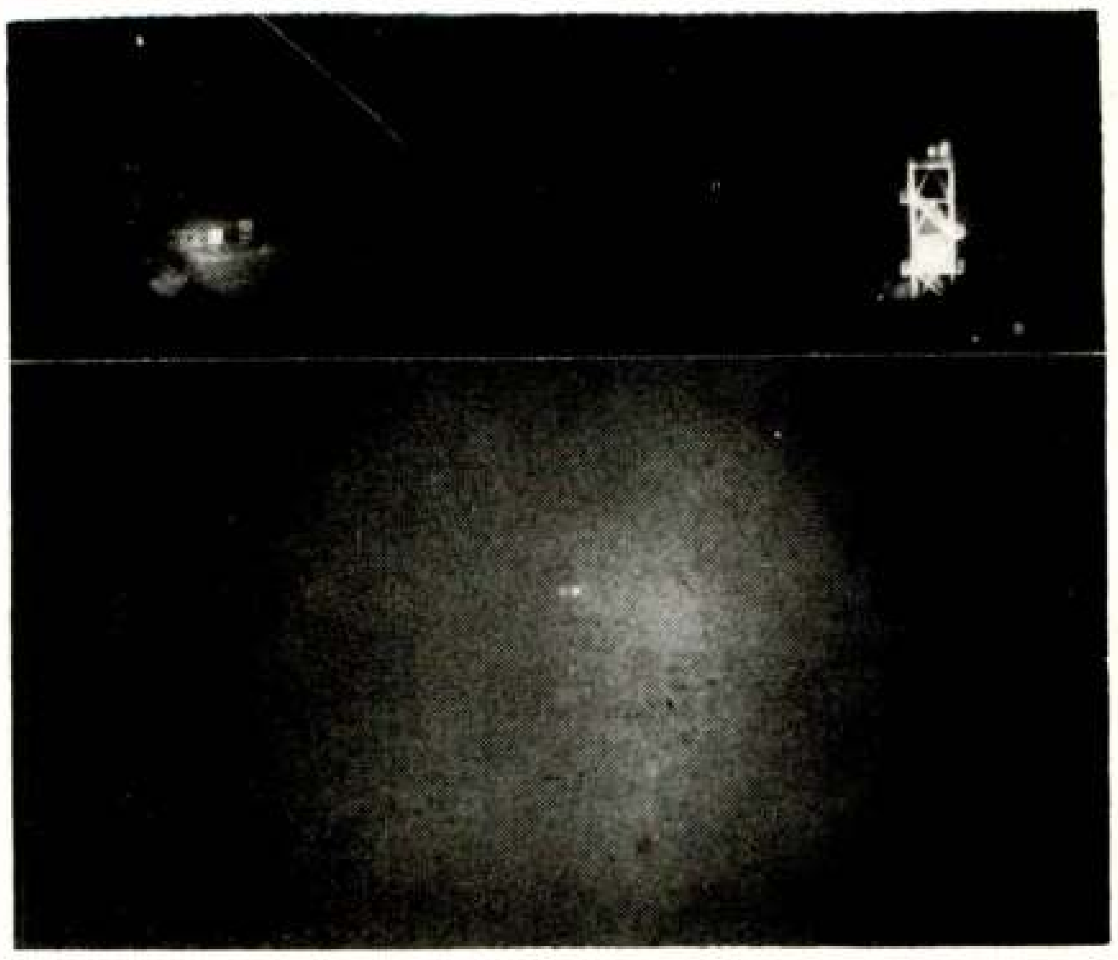


Fig.7. Passieve en actieve waarneming van een voorwerp op 650 m.; zicht 1300 m.; 3-traps h.v.

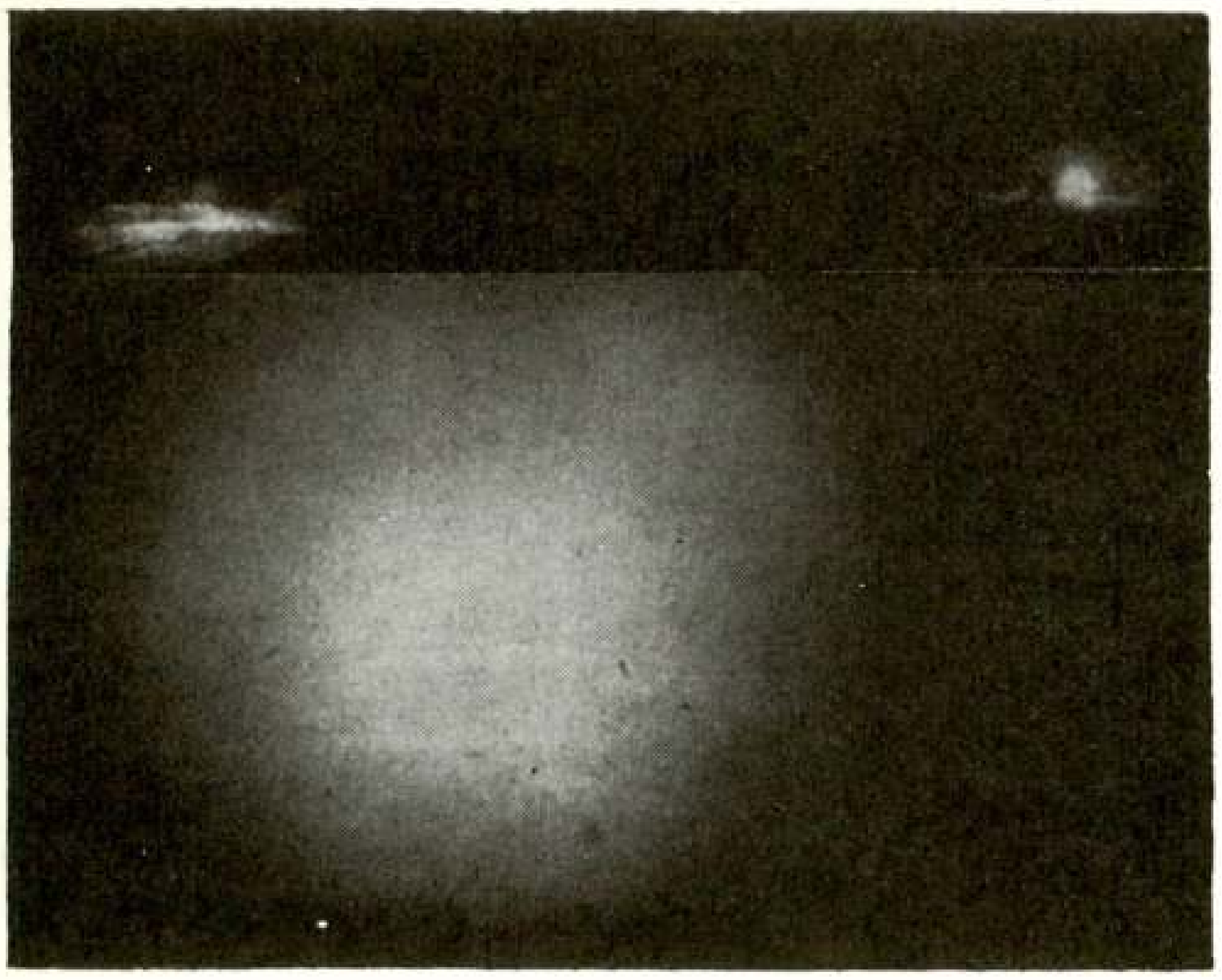
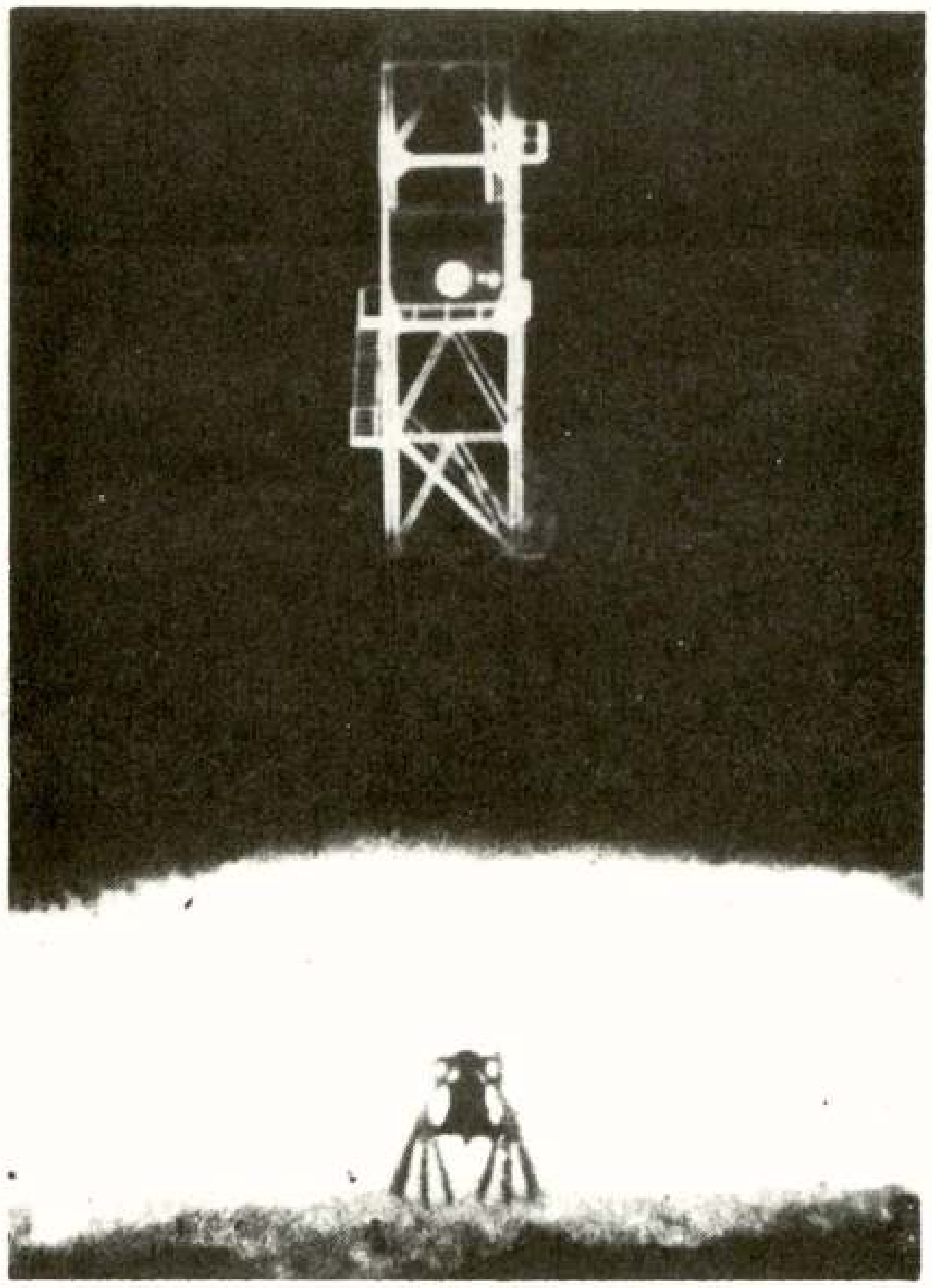


Fig. 8. Passieve en actieve waarneming van een voorwerp op 950 m.; zicht 1300 m.; 3-traps h.v.



b

Fig. 9. Waarneming in de actieve-mode van voorwerpen a. op 650 m.; b. op 950 m.; zicht 10 km, microkanaalversterker

In de fig. 7 en 8 zijn voorbeelden van het verschil in contrastverlies tussen het actieve en het passieve systeem gegeven. Het verschil is opmerkelijk. De eerste indruk is, dat het bereik van de grootte-orde van enkele km is bij zeer goede zichtcondities en van de grootte-orde van 1 km bij een optisch zicht van 1 km. Gezien de bescheiden waarde van het uitgezonden vermogen ($\sim$2 W) zijn deze resultaten veelbelovend.

Met behulp van een testkaart met strepen waarvan de reflectiecoëfficient 10% (zwart), c.q. 50% (grijs), bedroeg is een scheidend vermogen van $\sim$ 0,25 mrad gemeten. Dit komt ongeveer overeen met de waarde, die volgt uit de contrastoverdrachtsfunctie.

Omdat de pulsvormen van zowel de uitgezonden straling als die van de helderheidsversterker verre van rechthoekig zijn is de nauwkeurigheid in de afstandmeting slechts $\sim$20 m. Door toepassing van een buis, die speciaal voor dit doel is ontwikkeld en van een laser met een korte pulsduur moet het mogelijk zijn om een veel grotere nauwkeurigheid te bereiken.

De voordelen van de toepassing van een microkanaal versterkerbuis zijn gelegen in de lage schakelspanning, die vereist is (200 V). Hierdoor en door het feit, dat de focussering van de buis tijdens het schakelen niet verandert is het uiteindelijk te realiseren scheidend vermogen groter, zie fig. 9

<u>Bereik van een gated-viewing systeem</u>

Een schatting van het bereik van een gated-viewing systeem kan men als volgt verkrijgen. Om waar te kunnen nemen moet de verlichtingssterkte ter plaatse van het voorwerp ongeveer 10^{-3} lumen m^{-2} zijn. Wanneer men rekening houdt met de gevoeligheidskromme van een S-20 fotokathode berekent men hieruit een noodzakelijke fotonenflux ter plaatse van het voorwerp van :

$$\dot{N}'_{min} = 1,3\ 10^{13} \text{ fotonen } m^{-2}s^{-1}$$

Voor een verlichtingsbron met een golflengte van 0,85 µm en een fotokathode met een S-25 gevoeligheidskromme vindt men voor de vereiste fotonenflux

$$\dot{N} = 1,3\ 10^{13}\ \frac{\bar{\eta}_k}{\eta_k} \sim 1,3\ 10^{14} \text{ fotonen } m^{-2}s^{-1}$$

$\bar{\eta}_k$ = gemiddelde quantumrendement van een S-20 fotokathode ($\bar{\eta}_k \sim 0,1$)

η_k = quantumrendement van een S-25 fotokathode voor een golflengte $\lambda = 0,85$ µm ($\eta_k \sim 10^{-2}$)

Het minimaal vereiste vermogen is:

$$P_{min} = \frac{\pi}{4}\ \alpha^2 R^2\ 1,3\ 10^{14}\ (\frac{hc}{\lambda})\ T_r^{\ -2}\ (W)$$

α = bundeldivergentie

R = afstand in m.

T_r = transmissie van de atmosfeer

Voor een gegeven gemiddeld vermogen P vindt men voor het bereik R_{max}:

$$R_{max} \approx 2{,}1\ 10^2\ \frac{T_r}{\alpha}\ \sqrt{P}$$

Voor een gevraagd maximaal bereik van 10 km bij een transmissie van 5% en een gemiddeld vermogen van 40 W is de toegestane bundeldivergentie ongeveer 6,3 mr = 0,35°.

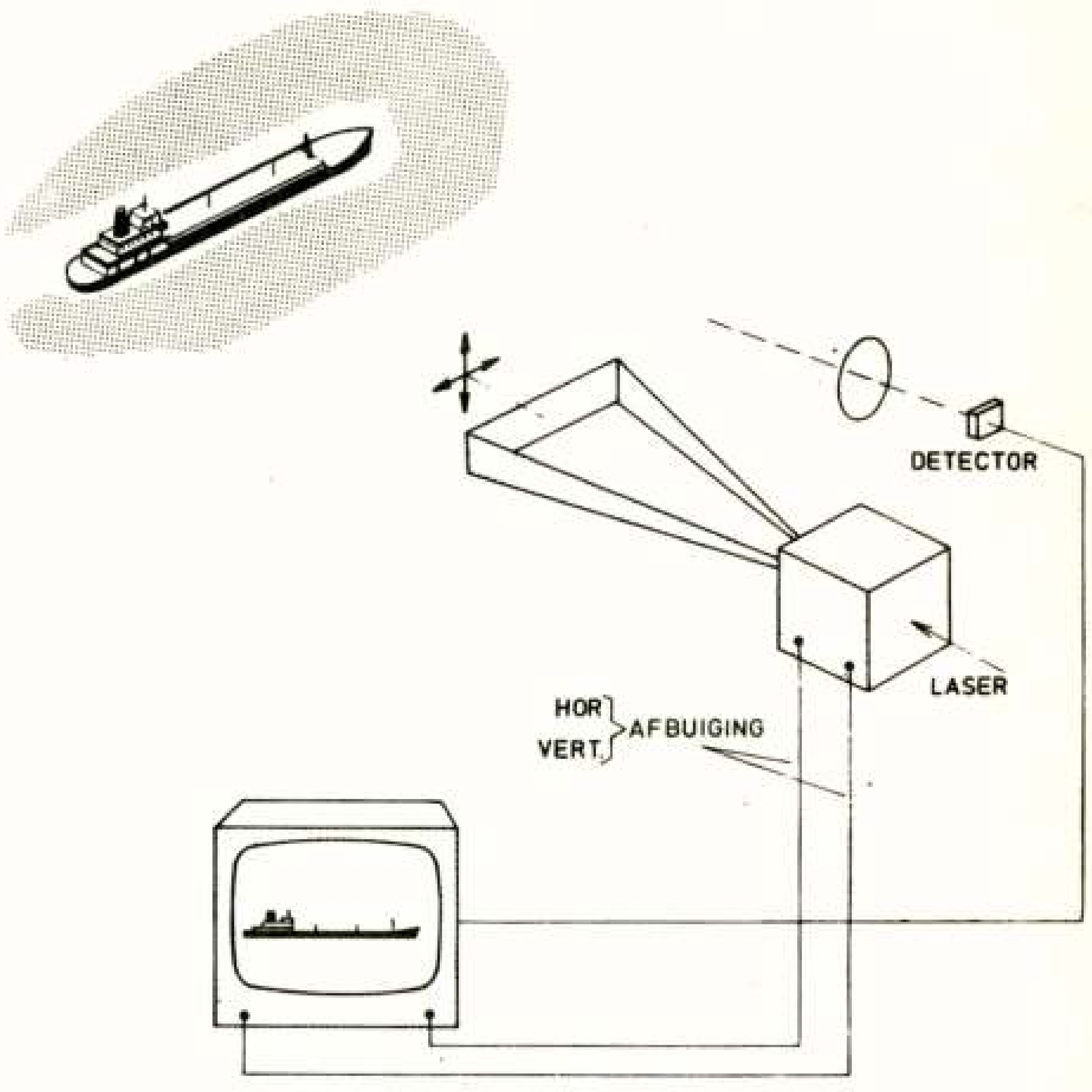


Fig.10. Principe van de laser-radar

Toepassing van een gated-viewing systeem

Het zal duidelijk zijn, dat een gated-viewing systeem voor waarneming op grote afstand, gezien het kleine gezichtsveld, niet zo geschikt is als detectiesysteem. Ook de lange zoektijd i.v.m. het additionele zoeken in de diepte is niet zo gunstig. Het systeem is echter bijzonder geschikt voor classificatie- en identificatie doeleinden. Als detectiesysteem zou dan parallel aan het gated-viewing systeem een radar- of een passief ver-infrarood zoeksysteem dienen te fungeren.

Opgemerkt dient te worden, dat voor deze identificatie een bijzonder goede optiek nodig is, nl. met én een grote gevoeligheid én een grote resolutie.

HET LASER-RADARSYSTEEM

Een ander waarnemingssysteem, waarbij het verlies in contrast door de atmosfeer gereduceerd kan worden is het laser-radarsysteem. In zo'n systeem wordt de richting van de uitgezonden laserbundel met behulp van optische systemen in azimut en elevatie afgebogen, zie fig. 10. De gereflecteerde straling wordt via een ontvangoptiek op een detector geconcentreerd. Het signaal van de detector moduleert de intensiteit van de elektronenbundel van een kathodestraalbuis. De positie van de "spot" op de fosfor van de weergavebuis correspondeert met de richting waarin de laserbundel wordt uitgezonden. Op deze wijze wordt een beeld van het tafereel verkregen.

Laboratorium modellen van een laser-radar

Om de eigenschappen van een laser-radar te bestuderen is door drs. C.W. Lamberts van het Physisch Laboratorium een aantal laboratoriumopstellingen gebouwd. In eerste instantie is een continue Helium-Neon laser (λ = 0,63 µm) als zender gebruikt en zijn opnames gemaakt van schaalmodellen, die op een afstand van 2,5 m geplaatst waren. Het uitgestraalde

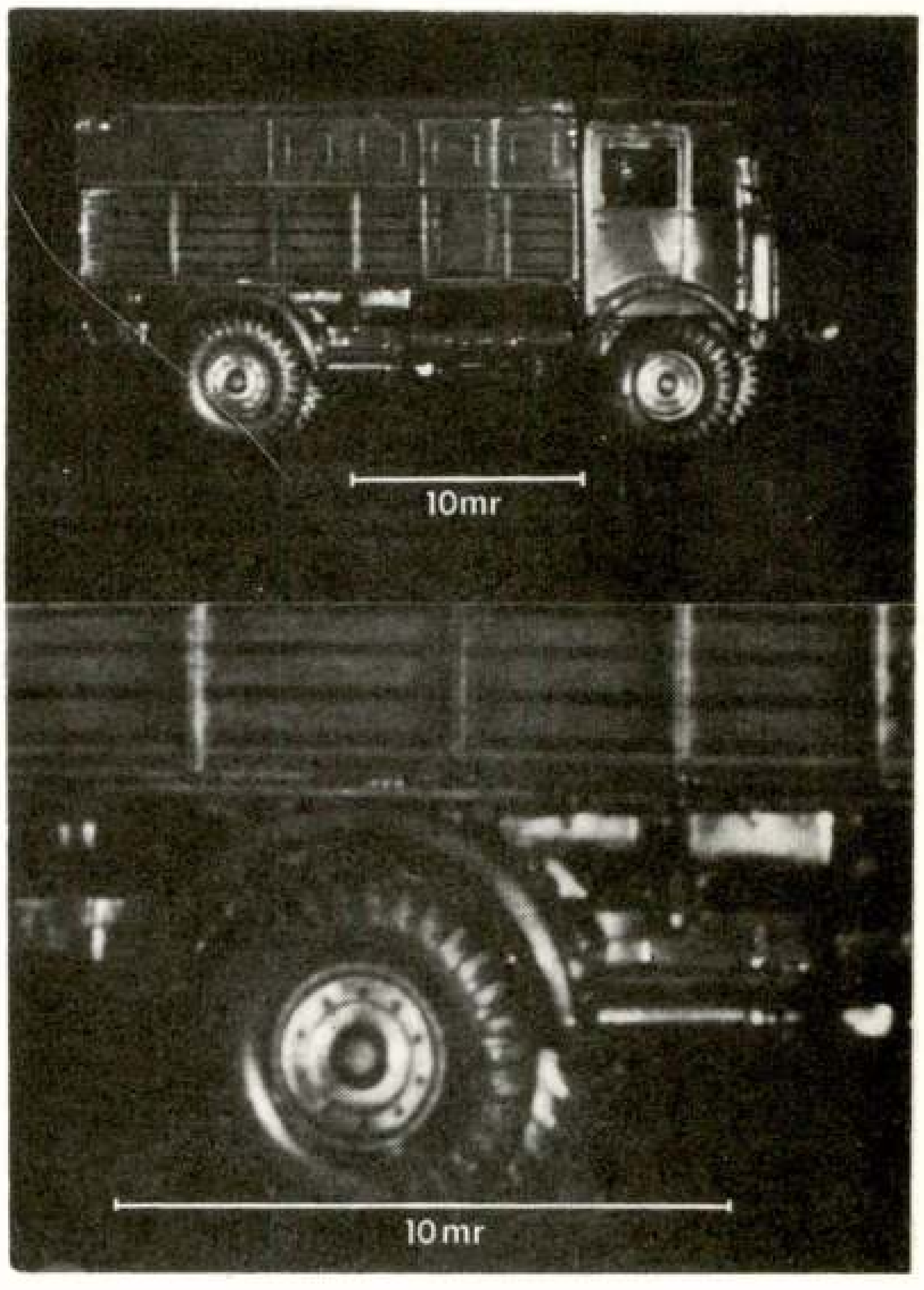


Fig.11. Resultaten verkregen met een continue He-Ne laser; afstand 2,5 m.

vermogen van de laser bedroeg 5 mW. De frequentie van de spiegel, die in de azimut richting trilde bedroeg 100 Hz, die van de spiegel trillend in de elevatierichting kon worden gevarieerd tussen 0,1 Hz en 1 Hz. Enige resultaten zijn gegeven in fig. 11.

De meest opmerkelijke eigenschap is, dat met een zeer simpele optiek een groot scheidend vermogen gerealiseerd kan worden. Dit wordt veroorzaakt door het feit, dat het scheidend vermogen van het laser-radarsysteem bepaald wordt door de grootte van de laservlek ter plaatse van het voorwerp. Deze grootte bedroeg in dit geval 0,15 mm. Op een afstand van 2,5 m volgt hieruit een scheidend vermogen van 60 µr!

De ontvangoptiek dient slechts om zoveel mogelijk straling op de fotodetector te concentreren en heeft geen afbeeldingsfunctie. Op deze wijze zijn dus de functies gevoeligheid en scheidend vermogen gescheiden.

Het is verder eenvoudig om met dit systeem te "zoomen" door de amplitudes van de trillende spiegels te verkleinen en de versterking voor de afbuigsystemen van de kathodestraalbuis te vergroten. Op deze wijze kan de lineaire vergroting met een factor 30 gevarieerd worden, terwijl nog steeds dezelfde eenvoudige optiek toegepast wordt.

Het laser-radarsysteem kan dus zowel dienst doen voor het zoeken (gezichtsveld $6^o \times 6^o$) als het identificeren (scheidend vermogen $\sim 0,1$ mr) van voorwerpen.

Vervolgens is door drs. Lamberts een opstelling met een Neodymium/YAG laser ($\lambda = 1,06$ µm) als zender ontwikkeld. De laser kan zowel continue als gepulste straling uitzenden. De maximale repetitiefrequentie bedraagt 25 kHz. Het piekvermogen van de uitgezonden straling P_t is 10 kW bij een pulsherhalingsfrequentie van 1 kHz en 1 kW bij 20 kHz. In continu bedrijf is het afgegeven vermogen in de TEM_{oo} mode 5 W.

De frequentie, waarmee de spiegel in de azimutrichting trilt kon worden verhoogd tot 1 kHz; in de elevatierichting is de frequentie van de trillende spiegel opgevoerd tot 10 Hz.

In fig. 12 is een van de eerste resultaten van deze laatste uitvoering gegeven. De persoon bevond zich in het laboratorium op een afstand van 56 m.

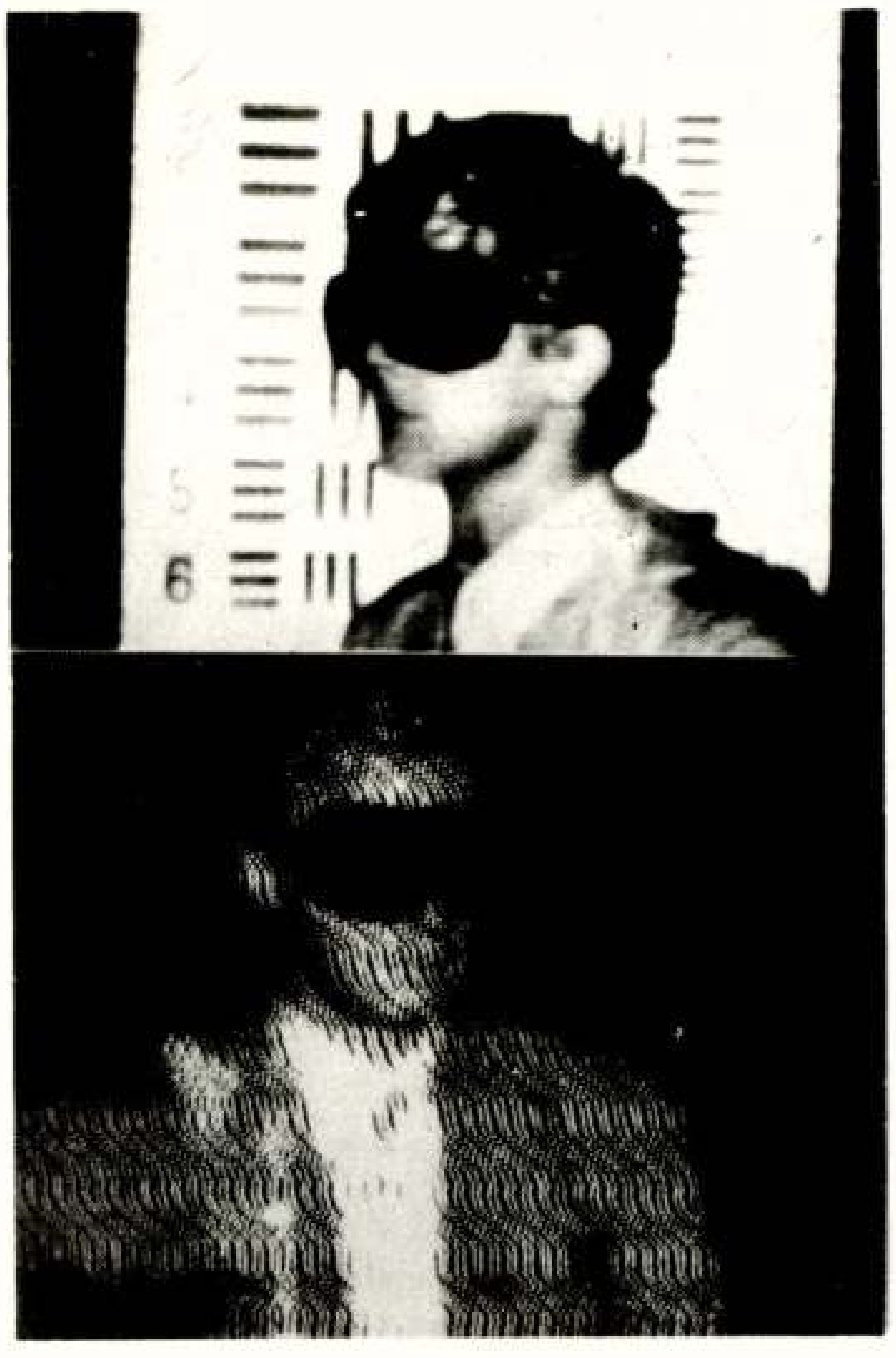


Fig. 12. Resultaten van de Nd/YAG laser-radar

Atmosferische beperkingen van het laser-radar systeem

Aangezien de toegepaste versterkers a.c. gekoppeld zijn wordt het contrastverlies in de atmosfeer t.g.v. statische lichtbronnen automatisch gereduceerd. Wanneer een gepulste laser gebruikt wordt kunnen "poort" technieken worden toegepast, analoog als bij "gated-viewing".

Het scheidend vermogen wordt mede bepaald door de turbulenties in de atmosfeer. Gemeten is, dat bij sterke turbulenties de spreiding van een laserbundel over afstanden van enkele km ongeveer 0,1 mr bedraagt. Bij zwakke turbulenties bedraagt deze spreiding ongeveer 20 µr[1].

Bereik van een laser-radarsysteem. Wanneer men een silicium fotodiode (zonder avalanche mulitiplicatie) als detector gebruikt, wordt de ruis bepaald door de ruis van de belastingsweerstand R_l van de fotodiode en het ruisgetal F van de versterker. De bijdrage t.g.v. fotonenruis, afkomstig van straling van de achtergrond is gering en kan door toepassing van filters nog verder verkleind worden.

De equivalente ruisstroom aan de ingang van de versterker wordt:

$$\sqrt{\overline{i_d^{\,2}}} = \sqrt{F\,\frac{4kTB}{R_l}}$$

T = absolute temperatuur van de belastingsweerstand R_l (300 K)
B = bandbreedte van de versterker

De bandbreedte B moet aangepast worden aan de stijgtijd van de pulsen, die door de laser worden uitge-

zonden. Bij een gemeten stijgtijd van 100 ns is de vereiste bandbreedte $B \sim 3$MHz. Bij een toelaatbare belastingsweerstand R_l van 2,5 kΩ is het ruisgetal $F \sim 2$. Men vindt zodoende:

$$\sqrt{\overline{i_d^2}} \sim 7.10^{-9} \text{ A}$$

Wanneer het vermogen van de op de detector vallende straling P_r bedraagt, is de signaalstroom i_s

$$i_s = \eta \frac{P_r}{h\nu} q \sim \eta P_r \sim 0,6 \; P_r$$

η = quantum rendement van de detector ($\eta \sim 0,6$ bij $\lambda = 1,06$ μm)

$h\nu$ = energie van een foton

q = lading van een elektron

Nemen we aan, dat de detectiegrens gesteld wordt door $i_s = \sqrt{\overline{i_d^2}}$ (data-processing!), dan vindt men voor het minimaal detecteerbare laservermogen:

$$P_r \geqslant 10^{-8} \text{ W}$$

Het signaal van een laser-radar wordt gegeven door:

$$P_r \sim P_t \; \Delta\varepsilon \left\{ \frac{D}{2R} \; T_r(\lambda) \right\}^2$$

We stellen: diameter ontvangoptiek: $D = 0,1$ m

verschil in diffuse reflectie coëfficienten van naburige punten: $\Delta\varepsilon = 10^{-1}$

Dit levert:

$$\frac{P_r}{P_t} \sim 2,5 \; 10^{-4} \left\{ \frac{T_r(\lambda)}{R} \right\}^2$$

De aangenomen waarde van $\Delta\varepsilon$ komt overeen met een contrast C:

$$C = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_o}{\varepsilon_v + \varepsilon_o} = \frac{\Delta\varepsilon}{2\bar{\varepsilon}} \sim 15\%,$$

aannemende dat de gemiddelde reflectiecoëfficient $\bar{\varepsilon}$ van het tafereel 30% bedraagt.

Het bereik R_{max} van een laser-radar vindt men door $P_r = 10^{-8}$ W te stellen. Dit levert:

$$R_{max} \sim 1,5 \; 10^2 \; T_r(\lambda) \; P_t^{\frac{1}{2}}$$

Voor $T_r(\lambda) = 1$ en $P_t = 1$ kW $R_{max} \sim 5$ km
10 kW ~ 15 km

In de praktijk geldt $T_r(\lambda) < 1$. Een gunstige omstandigheid is, dat de extinctie coëfficient bij een golflengte van 1,06 μm ongeveer de helft is van die in het zichtbare gebied. In tabel I is het verwachte bereik van een laser-radarsysteem gegeven, als functie van het optische zicht Z en het uitgezonden piekvermogen P_t.

P_t \ Z	∞	10 km	5 km
1 kW	5 km	3 km	2,2 km
10 kW	15 km	6 km	4 km

Tabel I: Bereik van een Neodymium laser-radar

Literatuur

1 T. Bakker, J. Vriend;
Transmission of focussed laserbeams through the atmosphere
Rapport Ph.L. 1973-17

2 A. v. Meeteren;
Thesis 1973, Utrecht

3 J. v. Schie;
Nocturnal Illumination and decrease of contrast in the atmosphere
Rapport Ph.L. 1969-4

Voordracht gehouden op 23 februari 1974 tijdens werkvergadering nr. 235, in het Philips Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven.

EEN NIEUWE SCINTILLATIE BEELDVERSTERKER CAMERA VOOR MEDISCH GEBRUIK

Ir. H. Mulder
Optische Industrie "De Oude Delft" Delft

An expression for the signal to noise ratio in the image of a medical scintillation camera has been analyzed. A substantial improvement is still possible by increasing the intrinsic resolution and MTF of the present cameras. The preliminary results obtained with a new scintillation camera, are given. This camera based on image intensifier tubes has an intrinsic resolution of 2,5 lp/cm. Evaluation of the camera in actual practice in an hospital is taking place.

INLEIDING

Het diagnostisch onderzoek van de belangrijkste organen in het menselijk lichaam m.b.v. radioactieve isotopen wordt steeds algemener aanvaard.

Zo'n isotoop wordt daartoe gebonden in een chemische verbinding met een zekere affiniteit voor het te onderzoeken orgaan in het menselijk lichaam ingebracht. Men maakt vervolgens gebruik van de gammastraling die bij het verval van de radioactieve atoomkernen vrijkomt, om de bron van deze straling te lokaliseren. Op deze wijze wordt inzicht verkregen over de verdeling of over de verandering van de verdeling van de chemische verbinding in het orgaan.

Het lokaliseren en identificeren van gezwellen in de hersenen, de schildklier, de lever en het skelet is m.b.v. deze methode vaak mogelijk en verder kan het functioneren van bepaalde organen worden nagegaan.

Verreweg het belangrijkste isotoop op het ogenblik is T_c^{99m}, dat zeer veel toepassing heeft gevonden, met een stralingsenergie van ca 140 keV. Dit tamelijk jonge gebied van de diagnostiek zal zeer zeker nog terrein winnen, enerzijds door het ter beschikking komen van nieuwe radioactieve isotopen met korte halfwaarde tijden, geschiktere gammastraling en gunstiger biochemische eigenschappen en anderzijds door de verbetering van het bestaande instrumentarium.

Het valt te verwachten dat in het bijzonder het medisch nucleair onderzoek van het hele lichaam (whole body scanning), het skelet, de hersenen en de longen meer routinematig zal gaan plaatsvinden.

Er bestaan twee methoden om de verdeling van de radioactiviteit over het orgaan vast te stellen.

De oudste methode is m.b.v. een mechanische aftastinrichting waarop zich een kollimator met detektor bevindt. Het werken met een dergelijk systeem, dat het object beeldpuntsgewijs aftast, is zeer tijdrovend en vereist veel geduldige onbeweeglijkheid van de patient en is alleen geschikt voor statische studies.

De tweede methode is m.b.v. een scintillatie- of gammakamera. Zo'n kamera werkt integraal over het hele object en daardoor veel sneller. Zijn de gevoeligheid en de verwerkingssnelheid groot genoeg, dan kunnen ook dynamische studies worden gemaakt.

Principe van de gammakamera

Afbeelding. Helaas is het nog niet mogelijk gammastraling van de voor ons interessante energiewaarden (> 60 keV) op een of andere wijze van richting te veranderen, zodat het niet mogelijk is een "lichtsterke" afbeelding te maken.

De afbeelding van het radioactieve voorwerp op de detektor van de gammakamera geschiedt d.m.v. projectie via een z.g. kollimator.

Er bestaan twee soorten kollimatoren, t.w. de z.g. enkelgatskollimator, bestaande uit een gat in een voor gammastraling ondoordringbare plaat (central projectie, principe van de camera obscura) en de z.g. meerkanaalskollimator bestaande uit min of meer parallele kanalen met voor gammastraling ondoordringbare wanden (loodrechte projektie). Deze laatste kollimator biedt voor grote objecten een beter kompromis tussen rendement en scheidend vermogen.

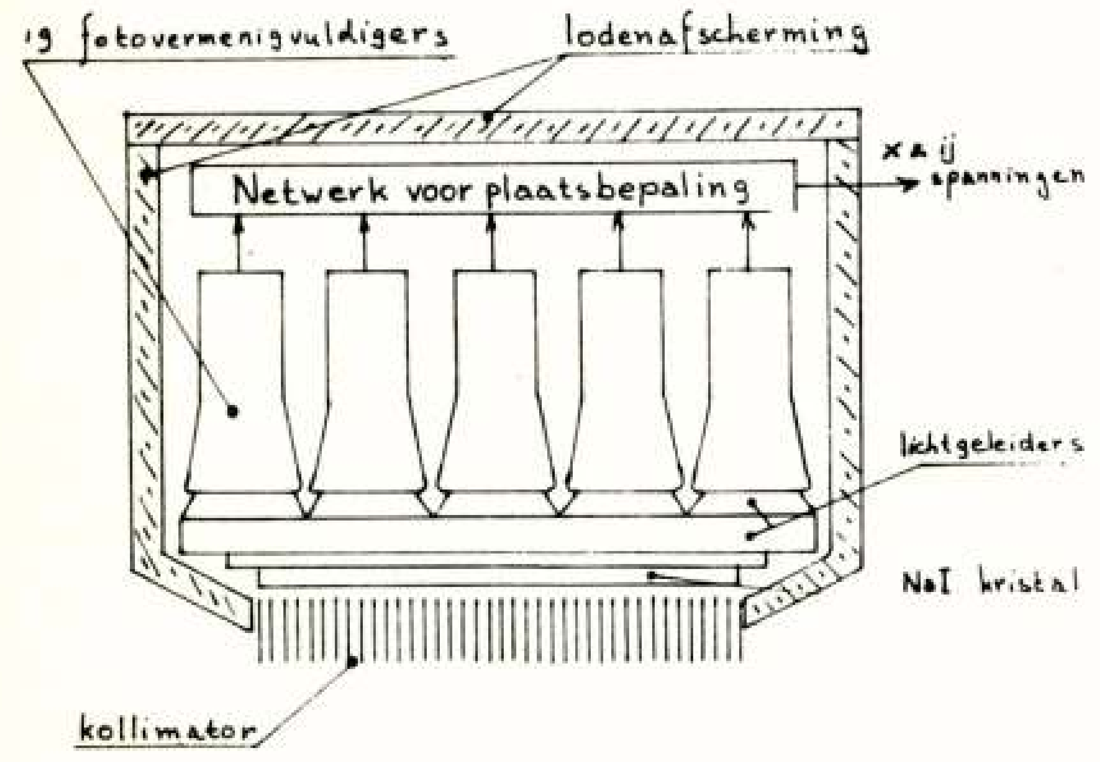
Beide soorten kollimatoren hebben het bezwaar, dat verbetering van het scheidend vermogen slechts mogelijk is door verkleining van de diameter van het gat respectievelijk het kanaal en dit leidt tot vermindering van het rendement van de kollimator. Pogingen dit dilemma te door-

breken zijn o.a. ondernomen door H.H.Barrett (1973).

Het is zinvoller te werken met de modulatieoverdrachtsfunktie, afgekort MTF i.p.v. het scheidend vermogen, dat slechts één punt van de voor de kwaliteit van de afbeelding belangrijke MTF-kurve vertegenwoordigt.

Plaatsbepaling scintillatie in detektor. De nauwkeurigheid waarmee de plaats van de scintillatie in de detektor wordt vastgelegd, bepaalt de z.g. intrinsieke MTF van de gammakamera.

We zullen ter illustratie in het kort de gammakamera volgens het Angersysteem beschrijven. Zie figuur 1.



figuur 1

De detektor bestaat uit een groot transparant scintillatiekristal van NaI(Th) met een diameter tot 40 cm en een dikte van ca 1,25 cm. Via lichtgeleiders staan 19 of meer fotovermenigvuldigerbuizen in optisch kontakt met het scintillatiekristal. Iedere optredende scintillatie produceert ter plaatse van de absorptie van een gammakwant t.g.v. het fotoelektrisch effekt een lichtflits in het kristal, bestaande uit een groot aantal fotonen, ca 40 per geabsorbeerde keV gammastraling. Een zo groot mogelijk deel van dit licht valt op de fotokathoden van de fotovermenigvuldigerbuizen. Uit de door deze buizen afgegeven elektrische spanningen, gekorreleerd met de plaats van de betreffende buizen wordt de plaats van de scintillatie in het kristal berekend.

Het is duidelijk dat voor gammastraling afkomstig van het isotoop T_c^{99m} met een energie van 140 keV het geringe aantal beschikbare fotoelektronen (totaal voor alle fotovermenigvuldigerbuizen ca 300) zal leiden tot aanzienlijke statistische fluktuaties in de afgegeven elektrische spanningen en de plaatsbepaling daardoor met een zekere onnauwkeurigheid wordt behept. Deze onnauwkeurigheid hangt bovendien af van de wijze waarop de koördinaten worden berekend.

Bij die systemen die bij de berekening gebruik maken van het z.g. vertragingslijnprincipe, bedraagt het intrinsieke scheidend vermogen ca 1,2 lp/cm. Voorlopig lijkt dit voor dergelijke systemen de grens. Zie Tanaka (1970).

Energieselectie. Een gammakamera kijkt door een verstrooiend medium heen. Afhankelijk van de keV-waarde van de straling en van de dikte van de patient komt slechts 20 à 40% van de oorspronkelijke door het isotoop uitgezonden straling rechtlijnig uit het lichaam. De rest van de straling wordt vrijwel geheel via comptonstrooiing in het lichaam omgezet in straling met lagere energie en veranderde richting. Deze richtingsverandering maakt het noodzakelijk de gammakamera te voorzien van een mogelijkheid de ontvangen gammakwanten stuk voor stuk te "wegen" en de te "lichte" kwanten te verbieden. Ook "zwaardere" kwanten afkomstig van o.a. kosmische straling moeten worden geëlimineerd. Men werkt daarom met een instelbaar energievenster. De selectiviteit van de gammakamera hangt in sterke mate af van het z.g. energiescheidend vermogen van de detektor.

Weergave. De weergave van de na energieselectie geaccepteerde scintillaties kan direkt plaats vinden op een monitor en worden gefotografeerd.

Voor het positioneren van de patient t.o.v. de kamera wordt een geheugenmonitor gebruikt, waarop het beeld in enkele seconden wordt opgebouwd.

Steeds vaker wordt het plaatje op de monitor geproduceerd nadat enige bewerkingen op de informatie zijn uitgevoerd. Hiervoor bestaan speciaal ontwikkelde rekeneenheden.

STAND VAN DE TECHNIEK

Bij het bekijken van een met een gammakamera opgenomen plaatje is het gewenst met een van te voren bekende waarschijnlijkheid een uitspraak te kunnen doen over de betekenis van de waargenomen dichtheidsvariaties. Het is duidelijk dat voor zo'n uitspraak een zeker aantal geregistreerde scintillaties in het betrokken gebied vereist is, ten einde de invloed van fluktuaties t.g.v. een slechte statistiek te be-

perken.

De huidige stand van de techniek heeft geleid tot systemen, waarmee het mogelijk is opnamen te maken in 2 à 3 minuten, waarin ca 2.10^5 scintillaties worden geregistreerd met een maximaal scheidend vermogen in het object van 0,6 lp/cm. De verwerkingssnelheid in dit geval ruim 10^3 scintillaties per seconde wordt enerzijds bepaald door het rendement van de kollimator en detektor (ca 10^{-4}) en anderzijds door de hoeveelheid (ca 2 mC) en soort (T_c^{99m}) radioaktiviteit in het orgaan. In de opname is een dichtheid van ca 400 geregistreerde scintillaties per cm^2 objekt normaal. D.w.z. de kans is ca 33% dat een detail van 1 cm^2 een niet significant ruiskontrast vertoont van 5% of meer t.g.v. statistische fluktuaties.

Het is de vraag in hoeverre van een fysisch standpunt gezien verbetering van de MTF en het scheidend vermogen zinvol is, indien niet tegelijkertijd de gevoeligheid van de gammakamera kan worden vergroot. Een antwoord op deze vraag wordt in het volgende hoofdstuk gegeven. Van een medisch standpunt gezien lijkt deze verbetering zeer gewenst.

SIGNAAL/RUIS-VERHOUDING

We zullen een signaal/ruisverhouding definieren, die in zeker opzicht een maat is voor de waarnemingswaarschijnlijkheid van details.

Als we het signaal van een periodiek objekt definieren als het verschil tussen het aantal scintillaties afkomstig van de ene helft en de andere helft van de periode en als de ruis wordt gedefinieerd als de spreiding in het verschil dan kunnen we de volgende uitdrukking voor de signaal/ruisverhouding afleiden:

$$S/_N = A\ Co \sqrt{\eta Dt}\ \frac{T}{s} \text{ met } T = T_k \cdot T_i$$

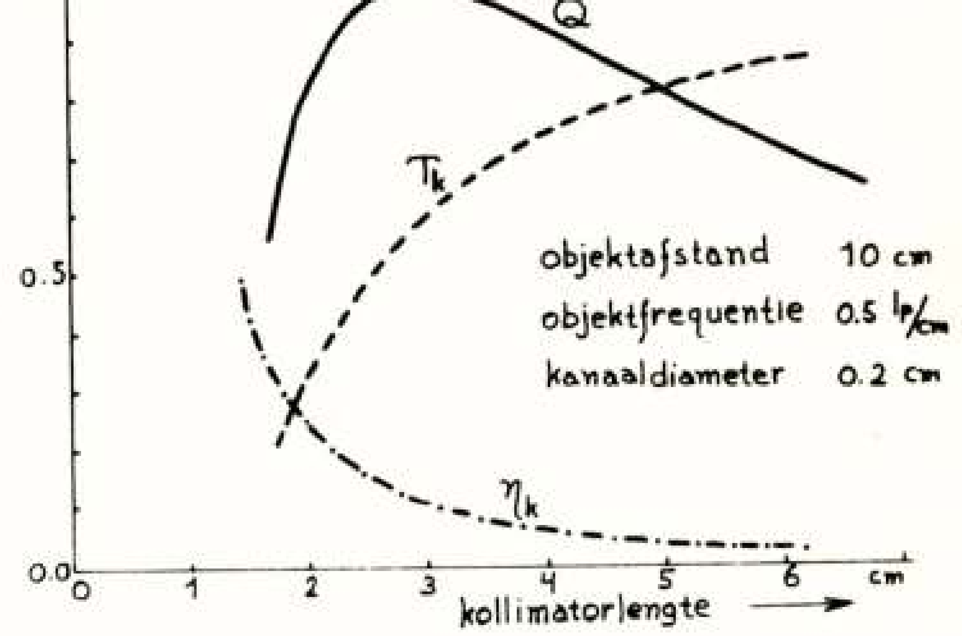
A is een konstante, die afhangt van de absorptie en strooiing in de patient, Co is het objectcontrast, η het rendement van de kollimator en de scintillator en hangt verder af van de keuze van de energieselectie, D is de dosis, t de opnametijd en T de MTF van de gehele gammakamera bij de ruimtelijke frequentie s in het objekt. T is het produkt van de MTF T_k van de kollimator en de intrinsieke MTF T_i van de rest van het systeem. Zie H.Mulder (1971).

Welke mogelijkheden hebben we om de signaal/ruisverhouding te vergroten, anders dan d.m.v. verlenging van de opnametijd?

H.O.Anger heeft er reeds op gewezen dat bij gelijke stralingsbelasting van de patient de toe te dienen dosis omgekeerd evenredig is met de halfwaardetijd van het isotoop. Het prepareren van de dosis en het opnemen ervan in het orgaan zal in de praktijk een halfwaardetijd van minimaal ca 1,5 uur nodig maken, een dergelijk isotoop zou een 4x zo hoge dosis toelaten als T_c^{99m} met een halfwaardetijd van 6 uur. Het is duidelijk dat intensief gezocht wordt naar dergelijke isotopen.

Het rendement η en de MTF T zijn systeemparameters, het is daarom zinvol een kwaliteitsfaktor $Q=\sqrt{\eta}\,T$ te definieren voor de gammakamera. Vergroting van het rendement van de kollimator is, zoals reeds gezegd, slechts mogelijk ten koste van de MTF T_k van de kollimator. De juiste keuze van de geometrie van de meerkanaalskollimator leidt bij gegeven objectafstand en ruimtelijke objectfrequentie tot een maximum voor de kwaliteitsfactor Q. I.h.a. is het zo dat dit maximum hoger ligt, naar mate de diameter van de kanalen kleiner is. Dit verklaart het streven naar meergatskollimatoren met een zeer groot aantal kanalen, veel groter dan het aantal te scheiden beeldpunten.

In figuur 2 staan uitgezet het rendement η en de kwaliteitsfaktor Q in een willekeurige maat en de MTF T_k als functie van de kollimatorlengte l. De objectafstand bedraagt 10 cm en de ruimtelijke objectfrequentie 0,5 lp/cm. De kanalen hebben een vierkante doorsnede met zijde 0,2 cm.



figuur 2

Uit de figuur blijkt dat het maximum voor Q wordt bereikt bij een kollimatorlengte van 3 cm. Hetzelfde object waargenomen met dezelfde

kollimator echter nu op een afstand van 5 cm geeft een 50% hogere waarde voor de signaal/ruisverhouding, ten gevolge van een evenredig hogere waarde van T_k. Voor deze situatie is de beste kollimator echter die met een lengte van 1,5 cm, waardoor Q nog eens 33% stijgt.

Vergroting van de signaal/ruisverhouding is uiteraard ook mogelijk door verhoging van de intrinsieke MTF. De huidige gammakamera's met een intrinsiek scheidend vermogen van 1,2 lp/cm hebben een intrinsieke MTF bij een frequentie van 0,5 lp/cm van ca 0,6. D.w.z. dat indien deze waarde zou kunnen worden verhoogd tot 1,een verbetering van de signaal/ruisverhouding met 66% mogelijk is.

Conclusie

Samenvattend kunnen we zeggen dat een aanzienlijke vergroting van de signaal/ruisverhouding en dus van de waarnemingswaarschijnlijkheid mogelijk is door verbetering van de intrinsieke MTF en door de juiste keuze van de kollimator. Bovendien kunnen nieuwe, korter levende radioactieve isotopen een belangrijke bijdrage geven aan de verhoging van de informatieinhoud van de opnamen.

GAMMAKAMERA OP BASIS VAN BEELDVERSTERKERS

Indien we de intrinsieke MTF en het scheidend vermogen van een gammakamera willen verbeteren, dan ligt het voor de hand gebruik te maken van beeldversterkerbuizen. We hebben gezien dat de principiele begrenzing van het Angersysteem wordt gegeven door het betrekkelijk kleine aantal fotoelektronen verdeeld over noodzakelijkerwijs meer dan 2 fotovermenigvuldigerbuizen. Indien we dan ook eerst m.b.v. beeldversterkerbuizen dit aantal elektronen, plaats gebonden, versterken dan kan in principe de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling onbeperkt groot worden gemaakt. Vele experimentele uitvoeringen van een dergelijk systeem zijn bekend. Zie N.F.Moody (1970). Beeldversterkerbuizen met een z.g. S20 fotokathode hebben in de praktijk een donkerstroom in de orde van grootte van 10^4 elektronen/cm^2s. Een deel van deze donkerstroom wordt veroorzaakt doordat ionen, ontstaan door ionisatie van altijd aanwezige restgassen, groepjes van 10-30 elektronen vrijmaken uit de fotokathode. Het is duidelijk dat dit verschijnsel tot een minimum moet worden beperkt, dit betekent dat een zeer goed vakuum vereist is. Ook een lage versnellingsspanning, dus een geringe versterking, geeft een kleine donkerstroom.

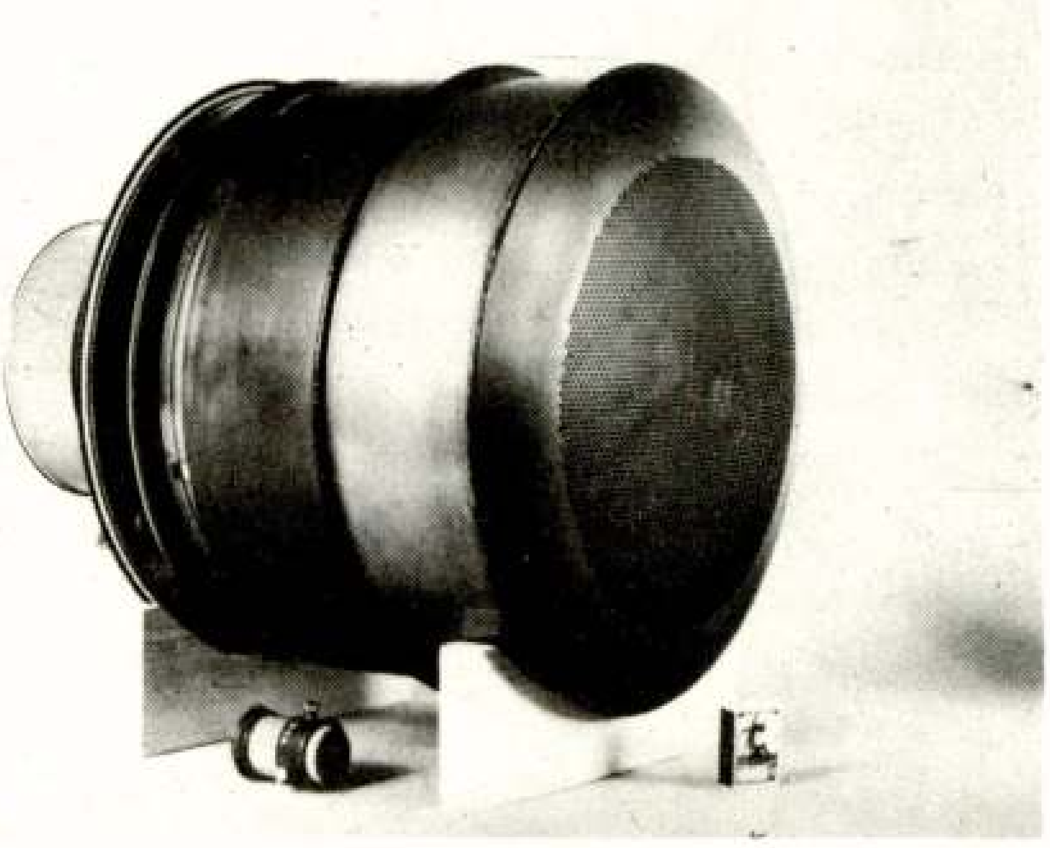
Een konsekwentie van de eis van een zeer goed vakuum is dat het scintillatiemateriaal bij voorkeur niet zoals gebruikelijk bij röntgenbeeldversterkerbuizen in het vakuum van de beeldversterkerbuis moet worden ondergebracht.

Het verkrijgen van een efficiente lichtkoppeling van de scintillatie in het kristal naar de fotokathode is gezien de donkerstroom noodzakelijk, doch m.b.v. optiek niet mogelijk. Ook glasvezeloptiek geeft onvoldoende koppeling, is zeer kostbaar en vaak enigszins radioaktief.

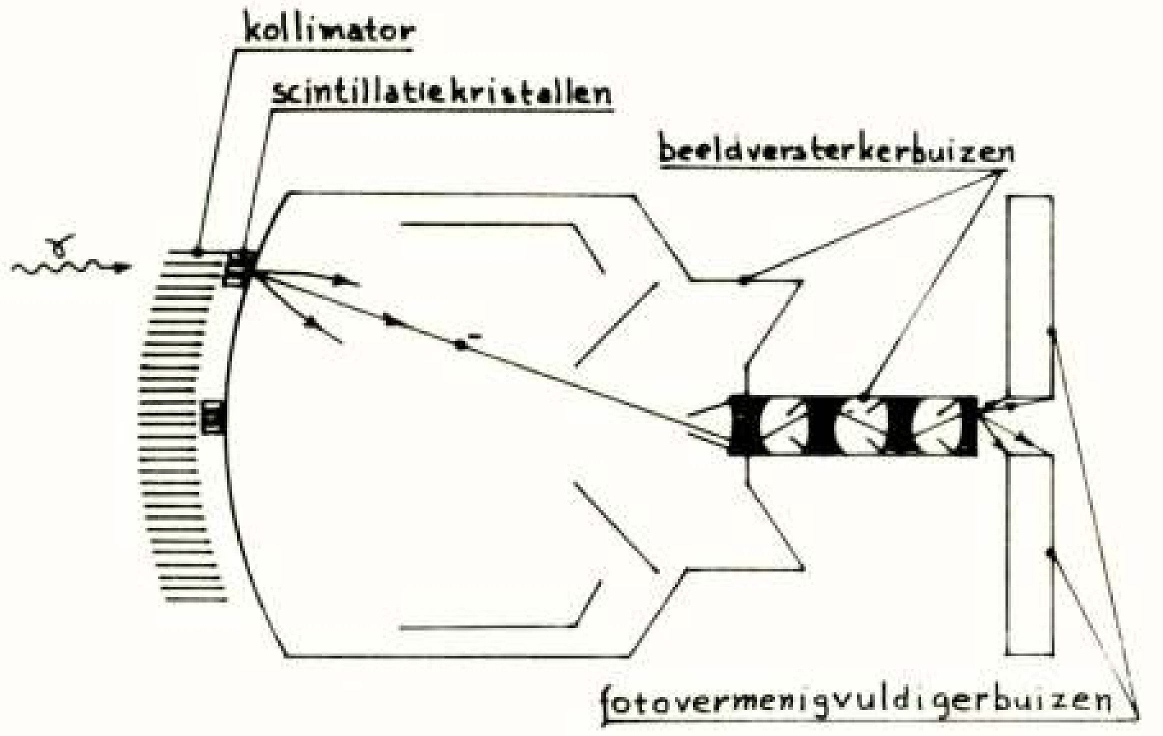
Kristalmozaiek op fotokathode

Wij hebben gekozen voor een kristalmozaiek bestaande uit ca 5000 kristallen verdeeld over een diameter van 300 mm. Elk cylindervormig kristal uit het mozaiek is bedekt met een witte reflector, met uitzondering van de onderkant, die in direkt optisch kontakt met de buitenzijde van het glazen kathodevenster is gebracht. De dikte van dit venster is zodanig gekozen dat de kristallen (diameter 3 mm) nog juist gescheiden op de fotogevoelige laag van de fotokathode worden "afgebeeld". Het kathodevenster heeft dan onvoldoende sterkte om het drukverschil van 1 atmosfeer te doorstaan en is daarom versmolten met een metalen drager die voorzien is van 5000 gaten, waarin zich de kristallen bevinden.

In figuur 3 staat de grote beeldversterkerbuis afgebeeld, de metalen drager is duidelijk zichtbaar. De hartafstand van de gaten en dus van de kristallen bedraagt 4 mm, de opstelling is hexagonaal. De elektronenoptische verkleining van deze beeldversterkerbuis is ca 12x, zodat de verdere versterking met drie kleine, eveneens afgebeelde, beeldversterkerbuizen kan plaats vinden.



In figuur 4 staat een schematisch overzicht van het systeem. Achter de laatste anode bevinden zich 4 fotovermenigvuldigerbuizen, waarvan er slechts twee zijn getekend. Voor het bepalen van de plaats van een scintillatie op de laatste anode wordt voor de x-koördinaat het verschil van de twee diametraal tegenoverelkaar gelegen x fotovermenigvuldigerspanningen genomen en op identieke wijze wordt de y-koördinaat bepaald. Doordat de intensiteit van de scintillatie binnen de breedte van het gekozen energievenster kan varieren is een normering noodzakelijk om de plaatsbepaling hiervoor invariant te maken. De verschilsignalen worden daartoe gedeeld door de som van de signalen van de 4 fotovermenigvuldigerbuizen.



figuur 4

De totale fotonenversterking van de vier met glasvezeloptiek gekoppelde beeldversterkerbuizen bedraagt ca 5000. Deze versterking wordt slechts op de as bereikt, aan de rand van het veld heeft iedere buis een versterking die een faktor 0,8 lager ligt, zodat de totale versterking aan de rand van het veld ca 2000 bedraagt. Deze vignettering wordt voor het belangrijkste deel veroorzaakt doordat de numerieke apertuur van de anode glasvezelplaten van het midden naar de rand afneemt t.g.v. de kromming van het inwendige oppervlak. Deze kromming is noodzakelijk om een goede elektronen optische afbeelding met weinig vertekening te verkrijgen.

De totale versterking is gering voor een 4 traps beeldversterkercombinatie, dit wordt veroorzaakt doordat zeer kort nalichtend anodeschermmateriaal is gebruikt met een laag lichtemissierendement en met een emissiepiek bij ca 400 nm golflengte. Voor dit soort straling is de absorptie in de glasvezeloptiek hoog.

Het voordeel van dit systeem, waarbij de kristallen gescheiden worden afgebeeld, is dat, met behulp van een fotografisch vervaardigd filter op de laatste anode aangebracht, het in principe mogelijk is de grootste verschillen tussen de kristallen en de plaatselijke verschillen in versterking van de beeldversterkerbuizen op te heffen. Hierdoor wordt het mogelijk een plaats onafhankelijke energieselectie toe te passen. Dit laatste is van buitengewoon groot belang om comptonstrooiing te kunnen elimineren en om bij elk willekeurig gekozen venster van de energieselector een homogene gevoeligheid te verkrijgen. Door dit filteren wordt de versterking aan de rand een faktor 2 kleiner en blijft een effectieve versterking van ca 1000 over. Gaan we uit van een omzettingsrendement van NaI van 12% dan betekent dit per geabsorbeerde gammakwant van 140 keV een totaal van ca 5600 fotonen, waarvan er ca 3000 op de fotokathode van de eerste beeldversterkerbuis vallen. Uit de laatste anode komen dan gemiddeld 3.10^6 fotonen en dit stelt ons in staat bij de gekozen geometrie de plaatsbepaling met voldoende nauwkeurigheid uit te voeren.

De onscherpte ontstaan door de afbeelding middels de beeldversterkerbuizen is klein t.o.v. de afmetingen van de indivudele kristallen. Bovendien is de fotonenversterking per beeldversterker $\gg 1$. Voor de relatieve variantie van de door de 4 fotovermenigvuldigerbuizen bepaalde x-koördinaat geldt voor dit geval

$$\frac{var(x)}{\varepsilon^2(x)} = \frac{K_1}{N_o} + \frac{K_2}{n_o} \Delta z^2$$

K_1 en K_2 zijn konstanten die afhangen van de geometrie en de gevoeligheid van het plaatsbepalingssysteem. De eerste term kan willekeurig klein worden gemaakt door meer versterking toe te passen: N_o is het gemiddelde aantal fotonen geëmitteerd door de laatste anode per scintillatie. De tweede term bevat het gemiddelde aantal fotoelektronen n_o vrijgemaakt uit de eerste fotokathode en de spreiding Δz van het zwaartepunt van de lichtvlek op die fotokathode.
De invloed van deze term kan worden beperkt door een efficiente lichtkoppeling van kristal naar kathode, door een gevoelige fotokathode en door een geringe kathodevensterdikte. Zie ook G.Roux (1972).

Resultaten

Figuur 5 toont een opname van een schildklierphantoom gevuld met T_c^{99m}. De kristallen op de rechter opname zijn duidelijk gescheiden waar-

neembaar.

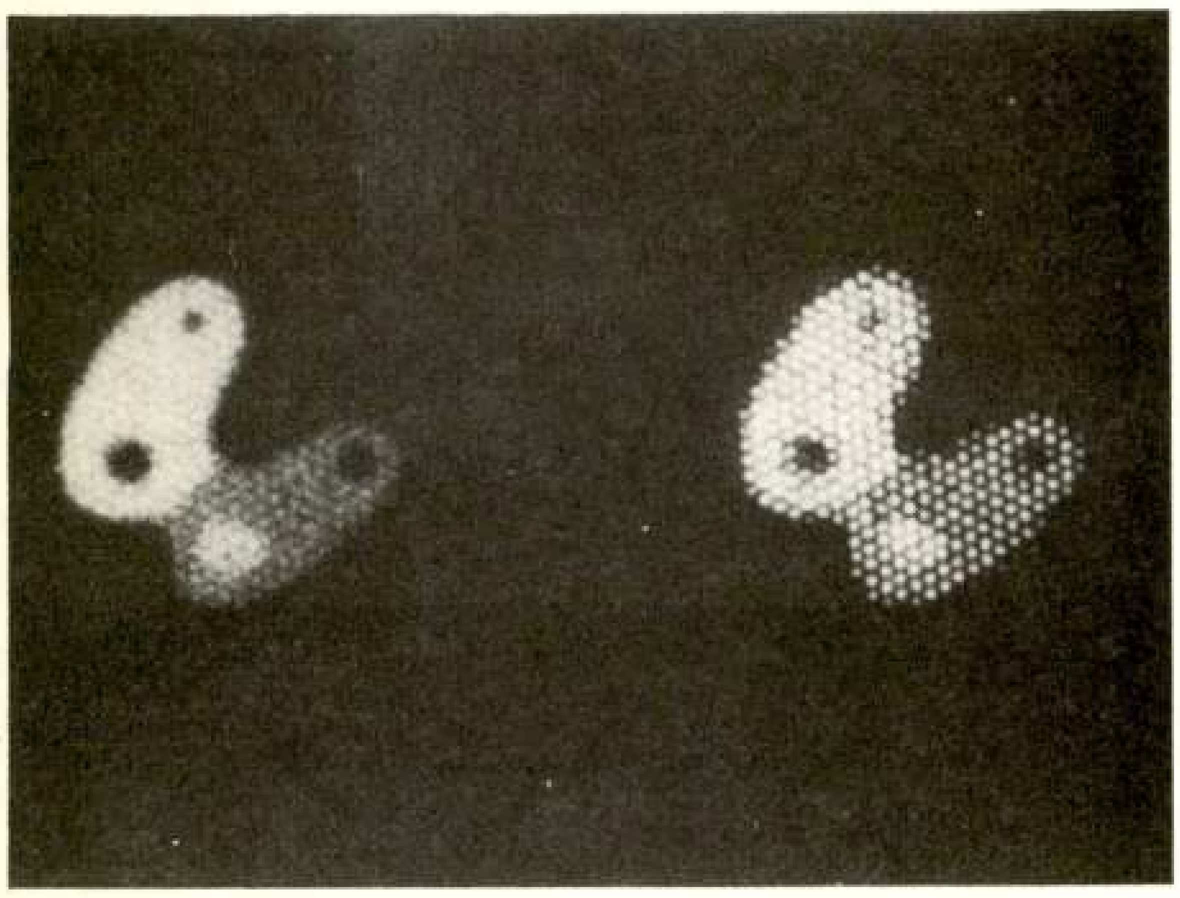


Fig.5

De hartafstand is 4 mm, het intrinsieke scheidend vermogen is beter dan 2,5 lp/cm. De linker opname is verkregen door tijdens de opname het phantoom te bewegen en elektronisch het beeld op de monitor stil te zetten. Hierdoor wordt het scheidend vermogen nog wat verbeterd, het storende kristalpatroon uitgesmeerd en worden eventuele inhomogeniteiten verminderd.



Fig.6

Figuur 6 toont een schedelopname waarop de keel- en neusholten waarneembaar zijn.



Fig.7

De kamera, zie fig.7, wordt thans in een ziekenhuis beproefd.

Literatuur

- H.H.Barrett and F.A.Horrigan, Fresnel Zone Plate Imaging of Gamma Rays; Theory, Applied Optics, vol 12, no 11, november 1973.
- N.F.Moody, W.Paul and M.L.G.Joy, A Survey of Medical Gamma-Ray Cameras, Proc. of the IEEE, vol 58, no 2, februari 1970.
- H.Mulder, Signal/Rausch-Verhältnis in bildübertragenden Systemen, Optik 32, 1971.
- G.Roux, J.C.Gaucher, A.Lansiart et J.Lequais, Détecteur Photoélectronique Analogique de la Position de Scintillations Faiblement Lumineuses, Photo-Electronic Image Devices, Academic Press 1972, page 1145.
- E.Tanaka, T.Hiramoto and N.Nohara, Scintillation Cameras Based on new Position Arithmetics, Journal of Nuclear Medicine, vol 11, no 9, 1970.

Voordracht gehouden op 22 februari 1974 tijdens werkvergadering no 235, in het Philips Natuurkundig Laboratorium, te Eindhoven.

VARIA

PERSONALIA

Samenvatting van de inaugurele rede van prof.ir. L. Krul, gewoon hoogleraar aan de Afdeling der elektrotechniek, gehouden op 3-4-1974 op de Technische Hogeschool Delft.
Als motto geeft prof. Krul twee regels uit een gedicht van Hans Andreus:

"Het beste woord dat ik kan geven is
een luisterapparaat voor een geweldige stilte".

Werking op afstand

Het is deze stilte die nodig is om de grote betekenis die de verschillende technische veroveringen voor onze samenleving hebben, te kunnen ervaren.

Zich richtend op het vakgebied van de microgolftechniek vroeg de spreker eerst aandacht voor de zo bekend geworden werkers van het eerste uur: Hertz, Marconi, Heaviside en Lord Rayleigh om zich daarna meer in het bijzonder te wijden aan die toepassingen van de microgolftechniek die gebruik maken van de reeds door Hertz in de jaren 1880 - 1890 waargenomen "werking op afstand".



Globaal kan men daarbij stellen dat er te beginnen met de radar in de jaren veertig, elke tien jaar een toepassingsgebied is bijgekomen. In de vijftiger jaren werden straalverbindingen, in de zestiger jaren werd de satellietcommunicatie en in de zeventiger jaren worden de zgn. industriële toepassingen aan het werkterrein van de microgolftechniek toegevoegd.

Steeds heeft daarbij een nieuwe toepassing ook nieuwe eisen aan de microgolftechniek gesteld. Zo introduceerde de straalverbinding de begrippen nauwkeurigheid en betrouwbaarheid terwijl de communicatie-toepassing die gebruik maakt van kunstmatige aardsatellieten daaraan nog het begrip gevoeligheid toevoegde. De industriële toepassingen, met als belangrijkste huidige exponent de microgolfverwarming, vragen tenslotte speciaal onze aandacht met betrekking tot de veiligheid. Met nadruk wijst de spreker erop dat de risico's verbonden aan het gebruik van microgolfstraling niet moeten worden vergeleken met de risico's verbonden aan het gebruik van radio-actieve straling. Microgolfstraling veroorzaakt namelijk warmteontwikkeling en werkt als zodanig, in tegenstelling tot radio-actieve straling, niet cumulatief.

Er is daarom steeds een zodanige grens voor de toelaatbare stralingsintensiteit aan te geven dat veilig kan worden gewerkt.

De volledige tekst van deze rede wordt door Delft University Press uitgegeven, en kan via de boekhandel worden besteld.

Prof. Krul is sedert 1955 lid van ons genootschap.

UIT HET NERG

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

Ir.O.J. Verbeij, Lichtenberg 62, Eindhoven.

Nieuwe leden

Ir. F.E. van Bochove, Bosb. Toussaintplein 178, Delft.
Ir. C.J. Hagenbeek, Ruthardlaan 35, Bussum.
Ir. J.J. Reijmers, De Kempenaerstraat 8, Delft.
Ir. M.F.M. Wijshoff, Geddingmoor 49, Nieuw Vennep.

Nieuwe adressen van leden

Ir. R.K. Bleekrode, Europaweg 42, Zwijndrecht.
Dr.ir. H.de Lange, Dzn., Parklaan 43, Bilthoven.
Ing. P.van Rooijen, E.J. Potgieterweg 40, Heiloo.
Ir. J.J. van Rijsinge, Cees Laseurlaan 141, Den Haag.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 39 - nr. 2 - 1974

druk: HET ZUIDEN Eindhoven.